

María Andrea Triana Montes

**ABORDAGEM INTEGRADA NO CICLO DE VIDA DE
HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL CONSIDERANDO
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Roberto Lamberts, PhD.

Coorientadora: Paola Sassi, PhD.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Triana Montes, Maria Andrea

Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas / Maria Andrea Triana Montes ; orientador, Roberto Lamberts ; coorientadora, Paola Sassi. - Florianópolis, SC, 2016. 473 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Habitação de interesse social. 3. Abordagem integrada no ciclo de vida energético. 4. Desempenho termoenergético. 5. Mudanças climáticas. I. Lamberts, Roberto. II. Sassi, Paola. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

María Andrea Triana Montes

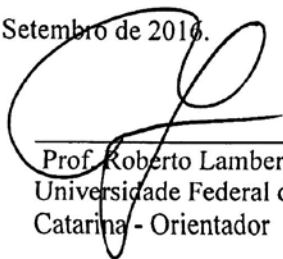
ABORDAGEM INTEGRADA NO CICLO DE VIDA DE
HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL CONSIDERANDO
MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de Setembro de 2016.



Prof. Clécio Trichês, Dr.
Coordenador do curso



Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Universidade Federal de Santa
Catarina - Orientador

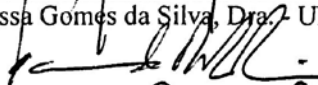
Banca examinadora:



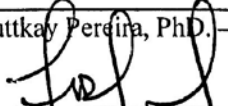
Prof. Doris Catharine Cornélie Knatz Kowaltowski, PhD.
UNICAMP (Videokonferência)



Prof. Vanessa Gomes da Silva, Dra. - UNICAMP



Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD. - UFSC/ARQ



Prof. Sebastião Roberto Soares, PhD. - UFSC/ENS



Prof. EneDir Ghisi, PhD. - UFSC/ECV

Ao meu esposo Olavo por
compartilhar comigo esta caminhada;
Ao meu filho Nicholas por ser meu
maior incentivo;
Aos meus pais, minha grande fonte de
inspiração....
A todos eles pelo seu amor e apoio
incondicional.

AGRADECIMENTOS

Escrever esta parte me dá um imenso prazer, pois é o momento de agradecer a pessoas e instituições que colaboraram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Roberto Lamberts, que mais do que um orientador tem sido um verdadeiro mestre em todo meu tempo junto ao LabEEE. Agradeço pelo tempo dispensado, pelas orientações, pelo incentivo, exigência e pela amizade. As palavras são poucas para expressar a minha gratidão e admiração, tem sido um prazer trabalhar e aprender por todo este tempo. O meu mais profundo agradecimento.

A minha coorientadora Paola Sassi, por ter me recebido na Faculdade de *Technology, Design and Environment* da Escola de Arquitetura na *Oxford Brookes University*; pelo tempo dispensado, as conversas, troca de ideias e oportunidades oferecidas durante o meu ano em Oxford.

Aos professores membros da banca, por aceitarem o convite para participar na avaliação e pelas contribuições muito relevantes que foram oferecidas.

Aos professores da UFSC com os quais cursei disciplinas durante o doutorado que foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos do LabEEE, por tantos encontros, conversas, cafés e aprendizado. Em especial a Rapha, Ana Paula, Ricardo, Miguel, Michele, Ulisses, Elisa, Aline, Deivis. À Juliana e Solange pela linda amizade, cumplicidade nos congressos, e, incentivo mesmo a distância. Ao Márcio por tantas conversas que foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. E ao Rogério e Renata por nossa “santa parceria”, na qual além de uma profunda amizade, encontro uma voz sempre pronta para a troca de ideias.

A meus amigos de doutorado da *Oxford Brookes University*, Célia, Salem, Sheikh, Ifonima, Julia, Turk, Achara, Aliye, Elisa e Sofia pela acolhida e pela troca de ideias, além dos almoços na “office”, *lunch seminars*, piqueniques no parque e eventos compartilhados. Também à Gabi e Késsia que participaram ativamente do meu tempo em Oxford. Aos professores da *Oxford Brookes* pelas oportunidades proporcionadas e as conversas que ajudaram no desenvolvimento da tese, e em especial à Maita, pelo seu entusiasmo e a sua acolhida, proporcionando um tempo muito especial em Oxford.

A Christianne, Olavo Coelho e à Pollyanna pelo seu apoio em diversos momentos.

Às companhias de habitação e às construtoras que cederam muito gentilmente os seus projetos para a realização deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que financiou grande parte desta pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que financiou o período do sanduíche na Inglaterra.

Aos meus amigos colombianos que passaram por Floripa deixando mais perto a Colômbia neste tempo de doutorado, em especial à Carolina, Catalina, Laura, Alejandro e Natália.

À Dona Gilda e o Doutor Olavo pelo apoio em todos os momentos.

À minha família na Colômbia que sempre se torna presente.

E finalmente um agradecimento mais que especial aos meus pais, esposo e filho. Aos meus pais, porque mesmo à distância sempre participam em cada uma das etapas da minha vida. Minha mãe pelo seu exemplo e palavras sempre amorosas de incentivo e apoio. Ao meu pai pelo interesse e entusiasmo nas minhas coisas.

Ao Nicholas, que, mais que um filho, é um parceiro incondicional e meu grande incentivador. E ao Olavo, meu companheiro na vida, pelo seu amor sempre, apoio e troca de ideias que tanto me ajudaram no desenvolvimento desta pesquisa. E aos dois por ter-me acompanhado durante o meu ano em Oxford, que fizeram dessa experiência infinitamente mais especial e única.

RESUMO

As habitações de interesse social apresentam-se como uma parcela importante no setor da construção do país devido a sua urgente necessidade de expansão. Entretanto, o que se observa é que nesse setor o desempenho térmico e medidas de eficiência energética não são priorizadas nos projetos, gerando uma grande oportunidade para estudos mais aprofundados na área. Contudo, o aumento da eficiência energética deve ser observado em função dos impactos e benefícios considerando aspectos do tripé da sustentabilidade no ciclo de vida da edificação. Igualmente devem ser consideradas as mudanças previstas no clima nas avaliações de desempenho termoenergético, as quais podem afetar muito o desempenho da edificação na sua vida útil. Com esse contexto, o objetivo geral desta pesquisa é a avaliação da incorporação de medidas de eficiência energética em projetos de habitação de interesse social no Brasil, por meio de uma abordagem integrada no ciclo de vida com adaptação às mudanças climáticas, que considere aspectos da sustentabilidade e foco no desempenho termoenergético do edifício. O método baseou-se na elaboração de projetos representativos de habitações de interesse social e a análise do seu desempenho termoenergético frente a parâmetros nacionais. Igualmente, efetuou-se avaliação por simulação termoenergética da influência das mudanças climáticas, considerando medidas de adaptação de eficiência energética na fase de uso da edificação. E, finalmente, foi proposta uma abordagem integrada para avaliação das medidas de adaptação nos projetos de habitações de interesse social, considerando 50 anos de vida útil. A abordagem integrada propôs um Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético como forma de comparação entre os casos avaliados, com o objetivo de se estimar as estratégias que apresentaram melhor desempenho de forma global frente às mudanças climáticas. O Índice considerou o desempenho com relação a indicadores intermediários e finais (consumo energético no ciclo de vida, custo no ciclo de vida, emissões de CO₂ no ciclo de vida e graus-hora de resfriamento e aquecimento na operação da edificação). As análises foram realizadas para São Paulo e Salvador, cidades com alto deficit habitacional e climas diferenciados. Como resultado, foram elaborados cinco projetos de tipologias representativas do setor. A análise dos projetos representativos evidenciou falha na prática corrente na habitação de interesse social com relação ao desempenho termoenergético da edificação, em especial para o verão. Isso indicou um maior uso potencial do condicionamento artificial neste setor, o que confirma a necessidade de avaliação com

perspectiva em longo prazo. No nível de menor renda foram observados os resultados com mais baixo desempenho, setor em que se concentra o maior deficit habitacional. Nos cenários climáticos futuros, o projeto representativo, escolhido para análises posteriores, mostrou aumento significativo nos indicadores relacionados à necessidade de resfriamento e refrigeração em ambas as cidades. Medidas de adaptação avaliadas de forma isolada mostraram relevância diferente por cidade e, por vezes, por cenário climático e forma de operação da edificação. Medidas aplicadas em conjunto mostraram resultados ainda mais expressivos nos indicadores estudados. A incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos de habitações de interesse social construídos na atualidade apresentou grande potencial para melhoria do desempenho termoenergético e conforto do usuário, sendo imprescindíveis para os cenários de mudanças climáticas. A abordagem integrada proposta evidenciou a importância da seleção inicial de materiais nos projetos, considerando tanto seus impactos associados quanto o desempenho termoenergético da edificação na sua vida útil. Igualmente, a abordagem integrada também evidenciou a importância da fase de uso da edificação para o projeto representativo frente às mudanças previstas no clima. Considerando-se pesos iguais para todos os indicadores, os casos com medidas de adaptação mostraram ampla redução com relação ao projeto representativo nos indicadores de consumo energético e emissões de CO₂ no ciclo de vida, assim como de graus-hora de resfriamento e aquecimento nas cidades analisadas. No aspecto econômico, alguns casos com medidas mostraram melhor desempenho do que o caso base nos cenários de mudanças climáticas. Para os casos com medidas que mostraram aumento no indicador econômico quando comparados ao projeto representativo, as diferenças considerando as mudanças previstas no clima não foram significativas. Analisando o Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto, obtiveram-se amplas reduções quando comparados os casos com medidas de adaptação frente à prática atual. Os resultados desta pesquisa contribuem com a incorporação de uma abordagem mais holística para os projetos que estão sendo produzidos com o objetivo de saldar o deficit habitacional, de forma que considerem melhor desempenho energético com conforto térmico e menor consumo de recursos em longo prazo para os usuários e o país.

Palavras-chave: habitação de interesse social, abordagem integrada no ciclo de vida energético, desempenho termoenergético, mudanças climáticas.

ABSTRACT

Social housing is an important part of the country's construction sector due to its urgent need for expansion. However, what is observed, is that in that sector, thermal performance and energy and efficiency measures are not prioritized in the projects, which generate a great opportunity for further studies in the area. Nonetheless, the increase in energy efficiency should be observed in terms of impacts and benefits considering aspects of the sustainability tripod in the life cycle of the building. Likewise, climate change should be considered in the thermal and energy performance evaluations, which can greatly affect the performance of the building in its life cycle. With this context, the main goal of this research is to evaluate the incorporation of energy efficiency measures in Brazilian social housing, through an integrated life cycle approach with adaptation to climate change, considering aspects of sustainability with focus on the thermal and energy performance of the building. The method included the elaboration of social housing representative projects and the analysis of their thermal and energy performance against national parameters. Also, it was foreseen the evaluation by thermal and energy simulation of climate change's influence, considering measures of adaptation of energy efficiency, in the use phase of the building. Finally, an integrated approach was proposed to evaluate adaptation measures in social housing projects, considering 50 years of useful life. The integrated approach proposed a Sustainability Index in the Energy Life Cycle as a way of comparing the evaluated cases, in order to estimate the strategies that presented the best performance in all indicators in the face of climate change. The Index considered performance in relation to intermediate and final indicators (energy consumption in the life cycle, life cycle cost, CO₂ emissions in the life cycle as well as degree-hours for cooling and heating in the operation of the building). The analyses were carried out for São Paulo and Salvador, cities with high housing deficit and dissimilar climates. As a result, five projects of representative typologies of the sector were estimated. The analysis of the representative projects exposed a failure in the current practice in social housing in relation to the thermal and energy performance of the building, especially for summer. This indicated a potential use for the introduction of artificial conditioning in the sector, corroborating the need for evaluation with a long-term perspective. The lowest performing results were found at the lowest income level, a sector in which the largest housing deficit is concentrated. In the future climate scenarios, a representative project chosen for further analysis, showed a

significant increase in the indicators related to the need for cooling in both cities. Adaptation measures assessed in a parametric way presented different relevance by city and sometimes by climate scenario and operation form of the building. Measures applied in conjunction showed even more expressive results in the studied indicators. The incorporation of energy efficiency measures in the social housing projects being built today show a great potential for improving the thermal and energy performance and user comfort, being fundamental for climate change scenarios. The proposed integrated approach highlighted the importance of the initial selection of materials in the projects, considering both, their associated impacts as well as the thermal and energy performance of the building during its life time. It also showed the importance of the use phase of the building for the representative project when considering climate change. Considering equal weights for all indicators, the cases with adaptation measures showed a broad reduction in relation to the representative project in the indicators of energy consumption and CO₂ emissions in the life cycle, as well as degree-hours of cooling and heating, in both cities. In the economic aspect, some cases with measures showed better performance than the base case in the climate change scenarios. For the cases with measures that showed increase in this indicator with respect to the representative project, the differences, considering changes predicted in the climate, were not significant. Analysing the proposed Sustainability Index in the Energy Life Cycle, large reductions were obtained when comparing the cases with measures of adaptation to the current practice. The results of this research contribute to the incorporation of a more holistic approach to the projects that are being produced to solve the housing deficit, in order to consider better energy performance with thermal comfort, as well as lower resource consumption for users and the country in the long term.

Keywords: social housing, integrated approach in the energy life cycle, thermal and energy performance, climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do ciclo de vida nas edificações.	39
Figura 2 - Projetos de casas unifamiliares das Companhias de Habitação.	57
Figura 3 - Projetos de casas unifamiliares das Companhias de Habitação.	57
Figura 4 - Projeto Rubens Lara da CDHU.	61
Figura 5 - Projetos para habitação de interesse social resultados de concurso do IAB-SP.....	62
Figura 6 - Projetos de habitações de interesse social.	62
Figura 7 – Fronteiras do sistema para análise do ciclo de vida energético.	70
Figura 8 – Ciclo de vida energético das seis versões do mesmo edifício no caso analisado de Feist (1996).....	78
Figura 9 – Resultados da pesquisa de Paulsen e Sposto (2013).	84
Figura 10 – Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados com os limites de 80% (normativos) e de 90% (informativos).	89
Figura 11 – Dados de aceitabilidade térmica do experimento de De Vecchi (2011) plotados na zona de aceitabilidade de temperatura operativa para espaços naturalmente ventilados com zona para ajuste do clo.....	90
Figura 12 – Concentrações de CO ₂ eq para os diferentes cenários.	104
Figura 13 – Excesso de energia anual para os diferentes arquivos climáticos.	112
Figura 14 – BS EM 15978:2011 Sustentabilidade de trabalhos da construção. Avaliação de desempenho ambiental de edifícios - Método de cálculo (adaptado com permissão de BSI).....	120
Figura 15 – Processo de decisão multicritério.	123
Figura 16 – Método interativo com categorias de impacto para avaliação de sustentabilidade de reforma de habitações.	127
Figura 17 – Principais etapas do método.....	140
Figura 18 – Maiores detalhes do método proposto para a pesquisa. ...	140
Figura 19 – Mapa mostrando os estados com companhias de habitação e agentes públicos associadas à ABC.....	145
Figura 20 – Etapas para a elaboração dos projetos representativos do PMCMV.....	153
Figura 21 - Projetos representativos das tipologias para o Nível de renda 1.....	156

Figura 22 – Frequência de ocorrência da área útil na amostra de projetos.....	157
Figura 23 - Porcentagem de ventilação (a) e iluminação (b) com relação à área do piso nos diferentes ambientes.	160
Figura 24 – Resultados para ZB3 com azimute 0° e 3 absorvâncias das paredes 0,3, 0,5 e 0,7 para a casa unifamiliar.	162
Figura 25 – Resultados para ZB3 com quatro azimutes e (α) das paredes externas 0,6 para a casa unifamiliar.	163
Figura 26 – Resultados para ZB8 com azimute 0° e 3 (α) 0,3, 0,5 e 0,7 para a casa unifamiliar.	164
Figura 27 – Resultados para ZB8 com quatro azimutes e (α) das paredes externas 0,6 para a casa unifamiliar.	164
Figura 28 – Porcentagem de ventilação e iluminação com relação à área do piso para os ambientes principais na tipologia de casa geminada e limites do RTQ-R.....	167
Figura 29 – Resultados para ZB3 com azimute 0° e 3 absorvâncias das paredes externas 0,3, 0,5 e 0,7 para a unidade avaliada do projeto representativo de casa geminada térrea.....	169
Figura 30 – Resultados para ZB3 com 4 azimutes e absorvância das paredes externas 0,6 para para a unidade avaliada do projeto representativo de casa geminada térrea.....	170
Figura 31 – Resultados para ZB8 com azimute 0° e 3 (α) das paredes - casa geminada térrea.	171
Figura 32 – Resultados para ZB8 com quatro azimutes e (α) das paredes externas 0,6 para a casa geminada térrea.	171
Figura 33 – Análise da Etiqueta de Energia para o apartamento tipo do edifício multifamiliar com planta em formato H no Nível 1 – ZB3....	175
Figura 34 – Análise da Etiqueta de Energia para o apartamento tipo do edifício multifamiliar com planta em formato H no Nível 1 – ZB8....	176
Figura 35 – Porcentagens de ventilação e iluminação com relação à área do piso para o quarto 1 nos apartamentos 1(a) e 2 (b), tipologia linear do Nível de renda 2.	181
Figura 36 – Projeto representativo tipologia linear do Nível de renda 2.	182
Figura 37 – Avaliação para a ZB 3 tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos pavimento térreo e tipo.	183
Figura 38 - Avaliação para a ZB 3 tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos pavimento cobertura.	184
Figura 39 – Avaliação para a ZB 8 da tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos 1, 2 e 3 nos pavimentos térreo e tipo.	185

Figura 40 - Avaliação para a ZB 8 da tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos 1, 2 e 3 nos pavimentos térreo e tipo.....	186
Figura 41 – Projeto representativo tipologia multifamiliar com planta em formato H do Nível de renda 2.....	189
Figura 42 – Resultados frente ao RTQ-R na ZB3 do apartamento típico no projeto representativo da tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H do Nível de renda 2.	190
Figura 43 – Resultados frente ao RTQ-R na ZB8 do apartamento típico no projeto representativo da tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H do Nível de renda 2.	191
Figura 44 – Padrões de iluminação e para ambas as regiões.....	207
Figura 45– Padrões de ocupação para ambas as regiões.	207
Figura 46 - Medidas de adaptação avaliadas de forma isolada.	222
Figura 47 – Temperaturas médias mensais para São Paulo (a) e Salvador (b) considerando o cenário climático atual, e as previsões para 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3	230
Figura 48– Umidade relativa média mensal para São Paulo (a) e Salvador (b) considerando os cenários atual, 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3	231
Figura 49 – Radiação global horizontal média mensal para São Paulo (a) e Salvador (b) nos cenários atual, 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3.....	231
Figura 50 – Velocidade do vento média mensal para São Paulo (a) e Salvador (b) nos cenários atual, 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3.....	232
Figura 51 – Modelo de simulação da tipologia unifamiliar térrea – caso base para São Paulo e Salvador.....	233
Figura 52 – Resultados por orientação para caso base em São Paulo por cenário climático.	234
Figura 53 – Resultados por orientação para o caso base em Salvador por cenário climático.	235
Figura 54 – Situação do Norte considerado para o caso base conforme análise realizada.	236
Figura 55 – Graus-hora de resfriamento e aquecimento anual para o caso base em São Paulo nos cenários climáticos atual, 2020 e 2050.	237
Figura 56 – Temperaturas na sala de estar do caso base em São Paulo no cenário climático atual.	238
Figura 57 – Avaliação de conforto do ambiente sala de estar no caso base em São Paulo.....	239
Figura 58 – Porcentagens de horas de desconforto por frio, calor e horas de conforto anual para os três cenários climáticos em São Paulo.	240

Figura 59 – Consumo energético total anual por uso final para o caso base em São Paulo nos três cenários climáticos.....	241
Figura 60 – Emissões totais anuais por uso final para o caso base de São Paulo nos três cenários climáticos.	242
Figura 61 – Resultados para diferentes absorvâncias solares na parede externa do caso em São Paulo no cenário climático atual, 2020 e 2050.	244
Figura 62 – Relação entre consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento para paredes com diferentes absorvâncias.	246
Figura 63 – Resultados para o indicador de graus-hora com diferentes tipos de paredes externas na casa térrea unifamiliar em São Paulo considerando mudanças climáticas.	247
Figura 64 – Relação das propriedades térmicas das paredes externas com os graus-hora de resfriamento no cenário climático de 2050.	247
Figura 65 – Resultados para consumo energético e emissões de CO ₂ previstas anuais para a habitação em São Paulo com diferentes tipos de paredes e três cenários climáticos.	249
Figura 66 – Consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento para os tipos de paredes analisados em São Paulo nos três cenários climáticos.....	250
Figura 67 – Graus-hora de resfriamento e aquecimento para os tipos de cobertura analisados nos três cenários climáticos na habitação em São Paulo.	251
Figura 68 – Coberturas na casa térrea unifamiliar em São Paulo no cenário 2050.....	252
Figura 69 – Resultados para as coberturas analisadas na habitação em São Paulo para todos os cenários climáticos.....	254
Figura 70 – Consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento para as coberturas nos três cenários climáticos na habitação em São Paulo.....	255
Figura 71 – Resultados para o indicador de graus-hora nos forros analisados na habitação em São Paulo considerando os três cenários climáticos.....	256
Figura 72 - Resultados para forros analisados com relação ao consumo com AVAC e emissões de CO ₂ na habitação em SP nos três cenários climáticos.....	256
Figura 73 – Relação entre consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento nos forros para São Paulo nos três cenários climáticos.....	257

Figura 74 – Resultados das análises com diferentes esquadrias para a habitação em São Paulo nos três cenários climáticos.....	258
Figura 75 – Relação entre consumo previsto com refrigeração e graus-hora de resfriamento para as esquadrias analisadas na habitação em São Paulo nos três cenários climáticos.....	259
Figura 76 – Resultados com relação ao contato com o solo nos três cenários climáticos em São Paulo.	260
Figura 77 – Graus-hora de resfriamento para todas as medidas isoladas nos três cenários climáticos para a habitação na cidade de São Paulo.	261
Figura 78 – Graus-hora de aquecimento para todas as medidas isoladas nos três cenários climáticos para a habitação em São Paulo.	262
Figura 79 – Resultados por m ² do caso base e medidas de adaptação para o uso da habitação em São Paulo com condicionamento ambiental no cenário climático atual, 2020 e 2050.....	263
Figura 80 – Resultados para os três cenários climáticos das medidas combinadas na habitação em São Paulo para a operação com ventilação natural.....	266
Figura 81 – Resultados para consumo com refrigeração das medidas combinadas na habitação em São Paulo nos três cenários climáticos.	268
Figura 82– Resultados com indicadores normalizados para algumas medidas de adaptação analisadas em conjunto para a habitação em São Paulo no cenário climático atual.	270
Figura 83 – Resultados com indicadores normalizados para algumas medidas de adaptação analisadas em conjunto para a habitação em São Paulo no cenário de 2020.	271
Figura 84 – Resultados com indicadores normalizados para algumas medidas de adaptação analisadas em conjunto para a habitação em São Paulo no cenário de 2050.	271
Figura 85 – Indicadores com valores normalizados para os três cenários climáticos na habitação em São Paulo.	273
Figura 86 – Indicadores para a operação com ventilação natural para o caso base em Salvador nos três cenários climáticos.....	276
Figura 87 - Indicadores para a operação com condicionamento ambiental no caso base em Salvador nos três cenários climáticos.	278
Figura 88 – Resultados das medidas de adaptação isoladas para a habitação em Salvador na operação com ventilação natural.	279
Figura 89 – Resultados das medidas de adaptação isoladas em Salvador na operação com uso de AVAC.	280
Figura 90 – Resultados das medidas de adaptação isoladas em Salvador com relação às emissões de CO ₂ na operação.	280

Figura 91 – Relação entre graus-hora de resfriamento e consumo previsto de refrigeração para todas as medidas avaliadas nos três cenários climáticos.....	282
Figura 92 – Indicador na operação da edificação com ventilação natural nos três cenários climáticos em Salvador.....	284
Figura 93 – Indicador na operação da edificação com uso de AVAC nos três cenários climáticos em Salvador.....	285
Figura 94 – Medidas em conjunto com todos os indicadores normalizados para a habitação em Salvador.....	286
Figura 95 – Todos os indicadores nos três cenários climáticos para a habitação em Salvador.....	288
Figura 96 – Marco conceitual da abordagem proposta.....	294
Figura 97 – Projeto do caso base.....	297
Figura 98 – Fronteira do sistema adotado na metodologia nesta proposta.....	309
Figura 99– Estrutura da abordagem integrada proposta.....	333
Figura 100 –Energia incorporada para o caso base de São Paulo.....	339
Figura 101 – Energia incorporada inicial e recorrente por serviço para o caso base na cidade de São Paulo.....	341
Figura 102 – Energia incorporada total por materiais para o caso base na cidade de São Paulo.....	341
Figura 103 – Emissões de CO ₂ para o caso base na cidade de São Paulo.....	342
Figura 104 – Emissões de CO ₂ incorporadas totais por serviço para o caso base na cidade de São Paulo.....	343
Figura 105 – Emissões de CO ₂ incorporadas totais por material para o caso base na cidade de São Paulo.....	344
Figura 106 – Porcentagem do custo na fase de pré-uso e etapa de manutenção para o caso base na cidade de São Paulo.....	345
Figura 107 – Custo por serviço na fase de pré-uso e etapa de manutenção para o caso base na cidade de São Paulo.....	346
Figura 108 – Custo na fase de pré-uso e etapa de manutenção por material para o caso base na cidade de São Paulo.....	346
Figura 109 – Resultados do consumo de energia primária na operação total da edificação (50 anos) com o uso de AVAC previsto para os três cenários climáticos analisados do caso base em São Paulo.....	347
Figura 110 – Resultados das emissões relativas ao consumo de energia na operação total da edificação com o uso de AVAC para os três cenários climáticos analisados do caso base em São Paulo.....	348

Figura 111 – Resultados dos custos relacionados ao consumo de energia na operação total da edificação (50 anos) com uso de AVAC para os três cenários climáticos analisados do caso base em São Paulo.....	349
Figura 112 – Ciclo de vida energético para o caso base em São Paulo no cenário climático atual	352
Figura 113 – Consumo de energia por etapas do ciclo de vida para o caso base em São Paulo no cenário climático 2050	353
Figura 114 – Emissões de CO ₂ por conta do consumo de energia para o caso base em São Paulo.....	357
Figura 115 – Etapas para avaliação de custos no ciclo de vida do caso base em São Paulo.....	360
Figura 116 – Resultados para o indicador de consumo energético no ciclo de vida para os casos em São Paulo.....	365
Figura 117 – Resultados para o indicador de emissões de CO ₂ no ciclo de vida para os casos em São Paulo	366
Figura 118 – Resultados para o indicador custo no ciclo de vida para os casos em São Paulo	368
Figura 119 – Resultados do indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento para os casos em São Paulo.....	369
Figura 120 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético com indicadores intermediários para os cinco casos avaliados na cidade de São Paulo.....	371
Figura 121 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético numérico, para o caso base e quatro alternativas avaliadas em São Paulo	372
Figura 122 – Índice de Sustentabilidade do Ciclo de Vida Energético gráfico com indicadores finais para o caso base e as quatro alternativas avaliadas em São Paulo considerando mudanças climáticas.....	373
Figura 123 – Índice de sustentabilidade do ciclo de vida energético gráfico para os casos em São Paulo avaliado por cenário climático. ..	374
Figura 124 – Composição do consumo energético para o caso base na cidade de Salvador.	377
Figura 125 – Resultados para o indicador de consumo de energia no ciclo de vida para todos os casos em Salvador.....	379
Figura 126 – Emissões de CO ₂ no ciclo de vida para o caso base na cidade de Salvador	380
Figura 127 – Resultados da avaliação ambiental no ciclo de vida para os casos em Salvador.	381
Figura 128 – Custos por etapas no caso base em Salvador	382
Figura 129 – Resultados do indicador de custo no ciclo de vida para os casos em Salvador	383

Figura 130 – Resultados do indicador de graus-hora para todos os casos na cidade de Salvador	385
Figura 131 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético com indicadores intermediários para os cinco casos avaliados na cidade de Salvador	386
Figura 132 – Índice de sustentabilidade no ciclo de vida energético numérico para o caso base e quatro alternativas avaliadas em São Paulo	386
Figura 133 – Índice gráfico de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético para todos os casos avaliados em Salvador.....	387
Figura 134– Estrutura em madeira para a casa que usa paredes em madeira (PAR5)	444

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações mínimas para Faixa 1 conforme o aporte de recursos.	51
Tabela 2 – Porcentagem (%) por uso final do total de consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro conforme diversos autores.	75
Tabela 3 – Relação entre energia incorporada inicial e pós-operacional em Tavares (2006).....	82
Tabela 4 – Resumo de dados de pesquisas com valores totais de ACVE.	85
Tabela 5 – Faixas de valores levantados em pesquisas nacionais para energia incorporada e emissões incorporadas dos materiais no Brasil.	86
Tabela 6 – Variação dos dados climáticos nos cenários simulados pelo IAG-USP.	113
Tabela 7 – Pesquisas que adotam abordagens integradas para avaliação do uso da energia no edifício ou componentes do edifício.....	130
Tabela 8 – Amostra 2 Faixa 1 – Número de projetos por tipologia. ...	146
Tabela 9 – Dados do Censo 2010 com relação a tipologias de habitações urbanas.	154
Tabela 10 – Resultados amostra 1.....	155
Tabela 11 – Valores na amostra para o projeto representativo da casa unifamiliar térrea.	158
Tabela 12 – Características das janelas da amostra de casa unifamiliar isolada.	159
Tabela 13 – Características principais do projeto representativo para a casa unifamiliar térrea com possibilidade de ampliação.	161
Tabela 14 – Valores na amostra e adotados para a tipologia de casa geminada térrea.	166
Tabela 15 – Principais características, planta e volumetria do projeto representativo para a tipologia de casa geminada.	168
Tabela 16 – Valores da amostra do apartamento típico para o edifício representativo com formato de planta em “H” – Nível 1.	173
Tabela 17 – Principais características do apartamento tipo para a tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H - Nível de renda 1.....	173
Tabela 18– Projetos por região e tipologia analisados para o Nível de renda 2 mostrando a tipologia em planta.....	178
Tabela 19 – Dados gerais para os três apartamentos tipo na tipologia linear com base na amostra dos 42 projetos.	179
Tabela 20 – Características principais para os três apartamentos típicos na tipologia linear – Valores da amostra e adotados para o projeto representativo.	180

Tabela 21 – Principais características do apartamento tipo na tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H para o Nível de renda 2.	188
Tabela 22 – Comparação de atendimento dos projetos representativos com os requisitos mínimos para desempenho térmico da NBR 15575 em relação às paredes, às coberturas e à área de ventilação nos ambientes.	193
Tabela 23 – Consumo estimado de energia elétrica para o caso base nas duas cidades.	205
Tabela 24 – Atividade metabólica para os usuários e número de usuários nos diferentes ambientes do caso base.	206
Tabela 25 – Propriedades térmicas dos materiais usados nas simulações da casa unifamiliar térrea – Caso base.	209
Tabela 26 – Propriedades térmicas dos materiais usados nos casos com medidas de adaptação.	210
Tabela 27 – Descrição, identificação e propriedades térmicas das medidas avaliadas de forma isolada para as duas cidades.	218
Tabela 28a – Propriedades térmicas das coberturas analisadas com forro em PVC.	223
Tabela 29 – Variáveis consideradas nas simulações da Etapa 2.	225
Tabela 30 – Médias mensais de temperatura exterior e temperatura do solo para a cidade de São Paulo nos três cenários climáticos analisados (em °C).	232
Tabela 31 – Médias mensais de temperatura exterior e temperatura do solo para a cidade de Salvador nos três cenários climáticos analisados (em °C)	233
Tabela 32 – Reduções observadas em algumas medidas de adaptação frente ao caso base para o indicador de graus-hora de resfriamento... ..	262
Tabela 33 – Reduções observadas no consumo previsto de AVAC para refrigeração e aquecimento em algumas medidas de adaptação frente ao caso base.	264
Tabela 34 – Variáveis analisadas nas simulações em conjunto para os três cenários climáticos na cidade de São Paulo.	264
Tabela 35 – Soma dos indicadores normalizados para o caso base no cenário climático atual.	272
Tabela 36 – Melhores cinco casos por tipo de parede para todos os cenários climáticos em SP, com suas características.	275
Tabela 37 – Variáveis analisadas na simulação em conjunto para os três cenários climáticos em Salvador.	283
Tabela 38 – Principais dados no caso base para ambas as cidades.	296

Tabela 39 – Características componentes para os casos avaliados em São Paulo.....	299
Tabela 40 – Características dos componentes para os casos avaliados na cidade de Salvador.	300
Tabela 41 – Componentes ou serviços considerados na análise da edificação.	302
Tabela 42 – Etapas previstas para a avaliação do ciclo de vida energético.	310
Tabela 43 – Etapas por fase consideradas para o cálculo do indicador de emissões de CO ₂ no ciclo de vida.....	316
Tabela 44 – Fases e etapas da avaliação econômica.	321
Tabela 45 – Índice Nacional de Custos do Transporte – Carga lotação (referência março 2016).	322
Tabela 46 – Índice Nacional de Custos da Construção e taxa SELIC nos últimos 10 anos.	324
Tabela 47 – Fase pré-uso identificando as etapas, a fonte de dados e as ferramentas usadas para cada indicador proposto na abordagem integrada.	329
Tabela 48 – Fase de uso identificando as etapas, a fonte de dados e as ferramentas usadas por indicador.....	330
Tabela 49 – Fase pós-uso identificando as etapas, a fonte de dados e as ferramentas usadas por indicador.....	332
Tabela 50 – Indicadores avaliados na abordagem integrada que compõem o índice de sustentabilidade no ciclo de vida energético proposto.....	334
Tabela 51 – Critérios avaliados na abordagem integrada que compõem o índice de sustentabilidade no ciclo de vida energético proposto.....	336
Tabela 52 – Resultados de graus-hora para o caso base de São Paulo	350
Tabela 53 – Comparação entre os resultados encontrados no caso base analisado no cenário climático atual e pesquisas nacionais e internacionais.	356
Tabela 54 – Indicadores avaliados nos cenários atual e de mudança climática para o caso base da casa unifamiliar isolada em São Paulo.	363
Tabela 55 – Comparação entre os resultados de consumo energético no ciclo de vida para os casos base de São Paulo e Salvador no cenário climático atual.....	378
Tabela 56 – Levantamento de pesquisas brasileiras que fornecem dados de conteúdo energético ou emissões de CO ₂ dos principais materiais de construção.....	429

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Associação Brasileira de COHABs e Agentes Públicos de Habitação
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVE	Avaliação do Ciclo de Vida Energético
ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV ou LCA	Análise do Ciclo de Vida
ACVE ou LCEA	Análise do Ciclo de Vida Energético
AHP	Analytic Hierarchy Process
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
AIIR	Taxa Interna de Rentabilidade Ajustada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ATHENA	Athena Impact Estimator
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
BNH	Banco Nacional de Habitação
BRE	Building Research Establishment
BREEAM	Sistema inglês de certificação de edificações do BRE
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CCV ou LCC	Custo do Ciclo de Vida
CEN	European Committee for Standardization
CEN/TC350	Comitê Técnico 350 do Comitê Europeu de Normalização
CDHU	Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano
CIB	Conselho Internacional de Construção
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
COHAB	Companhia de Habitação Popular
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CP	Compromise Programming
DGNB	German Sustainable Building Council
DPP	Período de retorno descontado
ECA	Custo Anual Equivalente
ECO	Eco Quantum Life Cycle and Greenhouse Gas
QUANTUM	Assessment

EH	Número de horas excedidas
ELECTRE	Elimination and Choice Translating Reality
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPW	Energy Plus Weather File
EQUER	Ferramenta francesa para análise do ciclo de vida
FAR	Fundo de Arrendamento Residencial
FDS	Fundo de Desenvolvimento Social
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
GEE	Gases de Efeito Estufa
GCM	Modelo de Circulação Geral
GWP	Global Warming Potential
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model version 3
HIS	Habitação de Interesse Social
IAB	Instituto de Arquitetos do Brasil
IAG/USP	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto Sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e Sobre Prestações de Serviços
ICV	Análise do Inventário do Ciclo de Vida
IEA	Agência Internacional de Energia
IES	Integrated Environmental Solutions
IFIAS	International Federation of Institutes for Advanced Study
IMPACT	Integrated Material Profile and Costing Tool
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LCSA	Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida ou Life Cycle Sustainability Assessment
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LEGEP	Ferramenta alemã para avaliação integrada do ciclo de vida
MCA	Método de Análise Multicritério
MCDA	Análise de Decisão Multicritério
MCDM	Tomada de Decisão Multicritério
NBR	Norma Brasileira
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OGIP	Ferramenta suíça para avaliação do ciclo de vida
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida

PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBQP–H	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat
PlanHab	Plano Nacional de Habitação
PMCMV	Programa “Minha Casa Minha Vida”
PIS	Programa de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PMV	Voto Médio Predito
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNE 2030	Plano Nacional de Energia 2030
PNHU	Programa Nacional de Habitação Urbana
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPD	Porcentagem Preditada de Insatisfeitos
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
RTQ–R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
Sedhab	Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental
SiAC	Sistema de Avaliação da Conformidade de Serviços e Obras
<i>SIR</i>	Savings to Investment Ratio
SINAT	Sistema Nacional de Avaliação Técnica
SINPHA	Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos
SFH	Sistema Financeiro da Habitação
SLCA	Social Life Cycle Assessment
SPV	Fator de valor presente único
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
TCPO	Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos
TIR	Taxa Interna de Retorno
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions
SUSHI	Sustainable Social Housing Initiative
UKCIP	UK Climate Impacts Programme
UNEP ou PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

VPL	Valor Presente Líquido
WPM	Método do produto dos pesos
WSM	Método da soma dos pesos
WMO	Organização Meteorológica Mundial
VUP	Vida Útil de Projeto
ZEB	<i>Zero Energy Buildings</i> - Edificações de energia zero

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	35
1.1 OBJETIVOS.....	45
1.1.1 Objetivo geral.....	45
1.1.2 Objetivos específicos.....	45
1.2 ESTRUTURA DA TESE.....	46
2. OBJETO DE ESTUDO – O SETOR DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL BRASILEIRO: PROJETOS NO “PROGRAMA MINHA CASA, MINHA VIDA”	49
2.1 CONTEXTO.....	49
2.2 O PROGRAMA MINHA CASA, MINHA VIDA.....	49
3. REVISÃO DE LITERATURA	65
3.1 SUSTENTABILIDADE E CONCEITO DO CICLO DE VIDA NAS EDIFICAÇÕES.....	65
3.1.1 Avaliação do ciclo de vida.....	66
3.1.2 Avaliação do ciclo de vida energético de edificações.....	70
3.1.3 Conforto térmico do usuário.....	87
3.1.4 Custo no ciclo de vida das edificações.....	92
3.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUA INTERAÇÃO COM A ENERGIA OPERACIONAL NAS EDIFICAÇÕES.....	98
3.2.1 Emissões de CO ₂	99
3.2.2 Cenários de emissão.....	102
3.2.3 Arquivos climáticos futuros para simulação termoenergética de edifícios.....	106
3.2.4 Incorporação de medidas de eficiência energética e baixo carbono nas edificações considerando a adaptação às mudanças climáticas.....	113
3.3 ABORDAGENS INTEGRADAS DO USO DA ENERGIA EM EDIFICAÇÕES CONSIDERANDO O CICLO DE VIDA.....	118
3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	136
4. MATERIAIS E MÉTODO	139
5. ELABORAÇÃO DE PROJETOS REPRESENTATIVOS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL E ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO	143
5.1 MATERIAIS E MÉTODO.....	143
5.1.1 Caracterização das habitações de interesse social com base no Censo 2010.....	143
5.1.2 Levantamento e caracterização de tipologias do PMCMV por faixa de renda.....	144

5.1.3	Elaboração de projetos de edificações representativas por faixa de renda	149
5.1.4	Análise dos modelos representativos com relação ao seu desempenho termoenergético atual.....	149
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO	153
5.2.1	Resultados para o nível 1 de renda familiar.....	154
5.2.1.1	Casa unifamiliar isolada	157
5.2.1.2	Casa geminada.....	165
5.2.1.3	Edifício multifamiliar com planta em formato H de quatro e cinco pavimentos – Nível de renda 1.....	172
5.2.2	Resultados para o Nível 2 de renda familiar.....	178
5.2.2.1	Edifício multifamiliar com tipologia em planta linear.....	179
5.2.2.2	Edifício multifamiliar com planta em formato H – Nível de renda 2	187
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	194
6.	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA FASE DE USO da edificação	197
6.1	MATERIAIS E MÉTODO	198
6.1.1	Arquivos de previsão de clima futuro para as cidades selecionadas.....	198
6.1.2	Preparação de dados para simulação termoenergética – Caso base do projeto representativo da casa unifamiliar térrea.....	200
6.1.2.1	Caracterização de usos finais e padrão de uso para simulação de habitação de interesse social do PMCMV	200
6.1.2.2	Materiais	208
6.1.2.3	Parâmetros para simulação com relação à operação da edificação.....	211
6.1.3	Definição de medidas de adaptação avaliadas.....	214
6.1.3.1	Análises das medidas isoladas.....	217
6.1.3.2	Medidas combinadas e análise do grau de efetividade.....	223
6.1.4	Indicadores para avaliação: consumo energético, emissões de CO ₂ e conforto térmico na fase operacional da edificação	225
6.1.4.1	Consumo energético anual previsto.....	225
6.1.4.2	Emissões de CO ₂ anuais previstas	226
6.1.4.3	Indicadores relacionados ao conforto térmico do usuário	227
6.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO	230
6.2.1	Arquivos climáticos futuros.....	230
6.2.2	Medidas para adaptação às mudanças climáticas	233

6.2.3 Resultados para a cidade de São Paulo.....	236
6.2.3.1 Caso base.....	237
6.2.3.2 Casos com medidas de eficiência energética para adaptação às mudanças climáticas – Cidade de São Paulo	243
6.2.4 Resultados para a cidade de Salvador	276
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	288
7. ABORDAGEM INTEGRADA PARA AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS PROJETOS DE HIS	293
7.1 MATERIAIS E MÉTODO.....	295
7.1.1 Casos avaliados	296
7.1.2 Parâmetros gerais	301
7.1.2 Avaliação do ciclo de vida energético.....	305
7.1.2.1 Definição de objetivo e escopo.....	305
7.1.2.2 Função, unidade funcional e fluxos de referência	306
7.1.2.3 Inventário do ciclo de vida	306
7.1.2.4 Fronteira do sistema	308
7.1.3 Avaliação de custos no ciclo de vida.....	320
7.1.3.1 Fase pré-uso.....	321
7.1.3.2 Fase uso	323
7.1.3.3 Fase pós-uso	326
7.1.4 Indicador relacionado ao conforto térmico do usuário.....	328
7.1.5 Abordagem integrada proposta	328
7.1.6 Índice de sustentabilidade no ciclo de vida energético.....	333
7.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	338
7.2.1 Resultados cidade São Paulo: caso base.....	338
7.2.1.1 Fase pré-uso e fase uso para manutenção	339
7.2.1.2 Etapa operacional	347
7.2.1.3 Fase pós-uso	351
7.2.1.4 Discussão dos resultados do caso base na cidade de São Paulo.....	352
7.2.1.5 Resultados para todos os casos analisados na cidade de São Paulo.....	363
7.2.1.6 Resultados do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético para a cidade de São Paulo.....	371
7.2.2 Resultados para todos os casos analisados na cidade de Salvador.....	376
7.2.2.1 Resultados do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético para Salvador.....	385

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	388
8. CONCLUSÕES	391
8.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	397
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	399
REFERÊNCIAS	401
APÊNDICE A. Pesquisas brasileiras de análise do ciclo de vida de edificações, materiais ou componentes.....	429
APÊNDICE B. Medidas de eficiência energética para adaptação às mudanças climáticas em projetos de habitações de interesse social. Nível de renda 1.....	433
APÊNDICE C. Identificação dos casos das simulações em conjunto e variáveis para São Paulo.....	437
APÊNDICE D. Identificação dos casos das simulações em conjunto e variáveis para Salvador	439
APÊNDICE E - Considerações de quantitativo de materiais do casobase em São Paulo e Salvador PARA ABORDAGEM INTEGRADA	441
APÊNDICE F - Considerações de quantitativo de materiais dos casos 1 a 4 para São Paulo e Salvador.....	443
APÊNDICE G. Distâncias de fabricantes de materiais considerados nas análises	445
G.1 Distância representativa de fabricantes de materiais para São Paulo	445
G.2. Distância representativa de fabricantes de materiais para Salvador.....	447
APÊNDICE H. Dados de materiais	449
H.1 Dados de vida útil de projeto usados na pesquisa. Base na 15575-1.....	449
H.2 Dados compilados de energia e emissões de CO ₂ incorporadas disponíveis em pesquisas brasileiras	451
H.3 Dados de alguns materiais compilados de energia, emissões de CO ₂ e emissões de CO ₂ eq incorporadas com base em dados internacionais.....	455
H.4 Custos iniciais dos materiais do caso base e medidas analisadas para São Paulo e Salvador com base no SINAPI de Março 2016 ..	459
H.5. Custos para deconstrução com base no SINAPI para São Paulo e Salvador	465
H.6. Caso base em São Paulo e Salvador: Quantitativo de materiais por componente	466

H.7. Dados de energia e emissão incorporada, densidade de massa aparente, desperdício e distancia dos materiais usados nos casos avaliados em SP e Salvador.....	467
H.8. Custos e vida útil dos materiais iniciais do caso base na cidade de São Paulo.....	469
H.9. Materiais iniciais (em kg) para o caso base e as alternativas analisadas em São Paulo e Salvador.....	471
H.10. Custos materiais casos 1 a 4 em São Paulo com base no SINAPI de março 2016	472
H.11. Custos materiais casos 1 a 4 em Salvador com base no SINAPI de março 2016	473
ANEXO A. Valores adotados para desperdício.....	474

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção ocasiona um alto impacto ambiental pela necessidade do uso de recursos naturais somado ao rápido crescimento populacional. O consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa apresentam-se como um dos principais focos do impacto da construção, influenciando nas mudanças climáticas por meio do aquecimento global. Esses impactos são ocasionados tanto pela operação das edificações, considerando que a geração de energia em muitos países é baseada, principalmente em combustíveis fósseis, quanto pela energia incorporada nos materiais de construção, seu transporte, extração e manufatura (CIB; UNEP–IETC, 2002), ou seja, na sua vida útil. Conforme McKinsey (2009), a vida útil das edificações varia entre 35 e 70 anos.

Nas edificações, o setor residencial apresenta preponderância em nível mundial com respeito ao consumo energético e emissões de gases de efeito estufa, representando na União Europeia 26% e no mundo 16% do consumo final de energia (PÉREZ–LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008). Nesse sentido, o uso racional da energia e metas de redução de emissão de carbono no setor das edificações estão sendo colocados por vários países como parte das suas políticas públicas, em especial no setor residencial (LI; COLOMBIER, 2009; MELCHERT, 2007; OSMANI; O'REILLY, 2009). Dentre as estratégias adotadas pelos países, encontram-se desde selos de eficiência energética governamentais até a adoção de conceitos, como o de edifícios com zero consumo de energia (*Zero Energy Buildings* – ZEB) ou edifícios com zero emissões (*zero carbon emissions*).

A nova diretiva da União Europeia sobre desempenho energético (EPBD) e a norma inglesa, com o documento *Building a Greener Future: Toward a Zero Carbon Development* de dezembro de 2006 (WANG; GWILLIAM; JONES, 2009) estão exigindo edifícios com alto desempenho em relação ao consumo de energia e emissões de CO₂. Para edifícios novos construídos para o setor residencial, a EPBD indicou que devam alcançar níveis quase zero de energia após 2020 e a proposta inglesa era de alcançar níveis de zero emissão até 2016. Porém, ambas as normativas referem-se à fase operacional, sem considerar metodologias de avaliação no ciclo de vida, o que se considera ser muito importante. Para König et al. (2010), tomar como base o conceito de ciclo de vida possibilita abordagens mais holísticas e a consideração de diversos

critérios. Entretanto, são necessárias novas formas de aproximação às edificações que considerem esses aspectos.

No Brasil, 39,4% da produção de energia primária corresponde a uma matriz renovável baseada, principalmente, em hidroelétricas (11,5%), madeira (8,1%) e produtos de cana-de-açúcar (15,7%) (BRASIL; EPE, 2015a). De forma similar, na oferta interna de energia elétrica¹ por fonte, 74,6% correspondem a fontes renováveis que incluem hidráulica com 65,2%,² biomassa com 7,4% e eólica com 2,0% (BRASIL; EPE, 2015a). A parcela de renováveis já foi maior no passado e, infelizmente, para o país essa situação tem tendência a continuar mudando por causa do crescimento da geração de energia térmica e também do aumento da demanda de energia. A capacidade instalada da geração térmica³ no Brasil aumentou em 41,2% considerando os anos de 2006 até 2010 (BRASIL; EPE, 2013) e ainda teve um crescimento de 18% entre 2013 e 2014 (BRASIL; EPE, 2015a).

De forma similar à tendência mundial, o setor residencial no Brasil representou a maior emissão de CO₂ nas edificações, ou seja 18,0 MtCO₂ em 2011, ou 3,7% do total de 485,2 MtCO_{2eq} de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira (BRASIL; EPE, 2015a). Igualmente, apresenta o maior consumo de energia com tendência de crescimento, sendo responsável por 9,3% do consumo final por setor e por 24,8% dos 49,9% correspondentes ao consumo de energia elétrica do setor de edificações (BRASIL; EPE, 2015a).

O Plano Nacional de Energia – PNE 2030 (BRASIL; MME; EPE 2007) mostra uma tendência de crescimento na participação da demanda de energia elétrica do setor residencial até 2030. Dependendo do cenário de crescimento considerado, estima-se que o setor alcance entre 24,3% e 28% da demanda total de energia elétrica. Para a média de consumo residencial de energia elétrica por mês, estima-se um aumento que pode chegar a valores entre 245 e 308 kWh/domicílio/mês até 2030,

¹ O consumo de eletricidade no Brasil é de 3.066 kWh per capita/ano com uma emissão de 2,4 tCO₂ per capita. Tanto o consumo de eletricidade quanto a emissão de CO₂ são considerados baixos quando comparados com a média mundial. Países como USA emitem 16,1tCO₂ per capita, enquanto a União Europeia e a China 6,5 e 6,1, respectivamente (BRASIL; EPE, 2015b).

² Hidráulica como fonte de energia elétrica correspondia a 84,5% em 2012 conforme Brasil e EPE (2015b).

³ Considerando carvão, derivados do petróleo, gás natural e incluindo a autoprodução.

dependendo do cenário de crescimento, o qual em 2012 foi de 166 kWh/domicílio/mês (BRASIL; MME; EPE, 2007).

O aumento no consumo de energia do setor pode ser explicado, em parte, porque na atualidade muitas edificações não respondem de maneira adequada às condições climáticas onde estão inseridas, além das mudanças que estão sendo experimentadas no clima. Com isso, procura-se mais conforto por meio de sistemas de condicionamento artificial. Igualmente há uma grande pressão por parte do crescimento da demanda com políticas típicas de países em desenvolvimento, que associam crescimento com baixo custo.

No setor residencial do Brasil há um alto deficit habitacional cuja maior porcentagem concentra-se na população com renda de até três salários mínimos (82,5%), variando de 72,4% no estado de Santa Catarina até 94,6% no estado do Pernambuco, e quando considerados até cinco salários mínimos, representando 92,6% do deficit (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2015a). O deficit total é estimado em 5,8 milhões de habitações, segundo nota técnica divulgada pela Fundação João Pinheiro, com uma incidência notadamente urbana de, aproximadamente, 85,7% (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2015b), estimando-se que chegue a 88% em 2030. As regiões do Sudeste e Nordeste são as que apresentam maior número de necessidade de habitações, principalmente nos estados de São Paulo e Bahia.

Em 2009 foi divulgado o Plano Nacional de Habitação (PlanHab) como forma de planejamento em longo prazo para o setor habitacional, tendo o ano de 2023 como horizonte final. Com ele, deveria ser implantado um conjunto de ações para universalizar o acesso à moradia digna (BRASIL, 2009). Entre as ações propostas pelo Plano, o “Programa Minha Casa, Minha Vida” (PMCMV), foi lançado pelo Ministério das Cidades, como uma das estratégias para reduzir o deficit habitacional, oferecendo subsídios e descontos por faixas de renda, sendo os maiores benefícios para a população com menores recursos (Faixa 1).

No Programa, as habitações de interesse social para as famílias de menor renda são executadas por meio das companhias de habitação, que, na maioria das vezes, são as responsáveis pelos projetos e por vezes, subcontratam empresas privadas para a sua execução e/ou concepção, operando o governo municipal em cooperação com o estado ou com o Governo Federal. Por outro lado, as habitações para populações com rendas maiores são executadas em grande parte por empresas privadas ou empreendedores isolados (UNEP, 2010a). Estima-se que sejam necessárias, em média, 1.520 milhões de habitações por ano entre 2012 e

2023, o que, junto ao déficit habitacional, somam 24 milhões de moradias (BRASIL; SEDHAB, 2012).

As políticas do governo no país indicam que a conservação da energia tem-se tornado um item muito relevante e, no cenário atual e futuro, as habitações de interesse social apresentam-se como uma parcela importante no setor da construção, devido a sua necessidade urgente de expansão. No entanto, um dos critérios do PMCMV para priorização de projetos nos municípios para a Faixa 1 é o menor valor de aquisição das unidades habitacionais (BRASIL; MINCIDADES, 2011b).

Com isso, a inclusão de medidas de eficiência energética nos projetos de habitação de interesse social pode ser muitas vezes difícil, devido à necessidade de construção de um número máximo de casas com quantidade limitada de investimento, resultando muitas vezes, em qualidade de construção e desempenho térmico baixo (BODACH; HAMHABER, 2010), em especial, para os projetos destinados às faixas de menor renda (ALMEIDA et al., 2013; CURCIO; SILVA, 2013a; LINCK; DE ALBERNARD; GRIGOLETTI, 2013; PEREIRA; KREMER; KUCHENBECKER, 1999; SILVA; DE PAULA; BARBIRATO, 2013).

Como resultado disso, projetos para o setor de habitações de interesse social nem sempre seguem as diretrizes de projeto por zona bioclimática (UNEP, 2010a), recomendadas pela norma para desempenho térmico de edificações – NBR 15220-3 (ABNT, 2005a) – ou as especificações mínimas da norma de desempenho mínimo para edifícios residenciais – NBR 15575 (ABNT, 2013) –, embora atualmente esteja sendo feito um esforço por parte do governo para a incorporação e o cumprimento da NBR 15575 nos projetos de habitações de interesse social (BRASIL; MINCIDADES, 2014). Ainda mais, geralmente, os projetos não seguem orientações para alcançar um alto desempenho na Etiquetagem de Energia do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R (BRASIL, 2012) do Inmetro/Procel Edifica.

Nesse sentido, Kowaltowski e Granja (2011) enfatizam que uma análise do custo-benefício de produtos de habitações sociais mais eficientes se apresenta como um desafio relevante na atualidade para o país. Especialmente no setor de menor renda, a situação atual da política habitacional, embora com algumas mudanças positivas observadas no último ano, ainda tende a priorizar custos iniciais, sem considerações mais aprofundadas nos benefícios ou no desempenho térmico em longo prazo. Como resultado disso, edificações com baixo desempenho térmico podem

causar durante a sua vida útil desconforto aos usuários, que, à medida que aumenta a sua renda, podem optar pelo uso do condicionamento ambiental. Isso pode significar para o país a necessidade de ampliação da sua infraestrutura energética, um aumento no consumo energético, de emissões de CO₂ do setor e de recursos, assim como um aumento no custo de operação da edificação para os usuários. Dessa forma, é muito importante considerar a implementação de medidas de eficiência energética e melhoria de desempenho térmico nas habitações de baixa renda. Contudo, outras variáveis devem ser associadas, pois observa-se que, de forma geral, o conceito do ciclo de vida da edificação e a relação impactos–benefícios em longo prazo não estão presentes nas diretrizes do PMCMV com relação ao desempenho termoenergético dos projetos que estão sendo aprovados.

Entende-se o estudo do ciclo de vida nas edificações compreendendo as etapas de manufatura dos materiais, construção, uso, manutenção e ainda o final da vida útil, o qual implica a análise do desempenho das variáveis e das decisões adotadas em função do tempo da vida útil (Figura1) (BAYER; GAMBLE; GENTRY, 2010), ligado intrinsecamente ao conceito de sustentabilidade, conforme CIB e UNEP (2002, p.8, tradução nossa).

“A construção sustentável é um processo holístico que busca restaurar e manter a harmonia entre os meios natural e edificado, e criar assentamentos que afirmem a dignidade humana e estimulem a equidade econômica [...] tomando como perspectiva o ciclo de vida”.

Figura 1 – Etapas do ciclo de vida nas edificações.



Fonte: Adaptado de: Bayer, Gamble e Gentry (2010).

Por outro lado, ao considerar-se a vida útil da edificação, várias questões podem influenciar o seu desempenho termoenergético, como o comportamento do usuário, a variação nas cargas internas, entre outras. No entanto, Williams et al. (2012) destacam as variações no clima ocasionadas pelas mudanças climáticas como um fator que pode ter grande influência. Nesse sentido, estudos para avaliação de medidas de

eficiência energética nos edifícios focados em medidas de mitigação e, principalmente, adaptação às mudanças climáticas estão surgindo, especialmente, em países de clima frio e considerados com maior desenvolvimento (GUPTA; GREGG, 2012; KERSHAW; EAMES; COLEY, 2011; PORRITT et al., 2011; VAN HOOFF et al., 2014). Ainda, alguns desses estudos são focados no setor de habitações de interesse social (RODERS; STRAUB, 2014).

No Brasil, destacam-se nesse tema algumas pesquisas, entre elas a de Casagrande (2013) e a de Alves, Duarte e Gonçalves (2015). A primeira analisou o desempenho termoenergético de edifícios comerciais frente a cenários de mudança climática para várias cidades no Brasil, e, a segunda considerou mudanças climáticas para melhoria do desempenho térmico de edifícios residenciais para idosos. Contudo, a grande maioria desses estudos, incluindo as pesquisas brasileiras não está vinculada à análise do uso da energia no ciclo de vida no edifício. Nesse sentido, Peupartier, Thiers e Guiavarch (2013) defendem que a ligação da simulação de energia e análise de ciclo de vida é muito relevante a fim de avaliar e, possivelmente, melhorar o desempenho do projeto de um edifício em termos globais.

Por outro lado, para CIB e UNEP (2002), o pensamento do ciclo de vida no setor da construção não deve abarcar, exclusivamente, a questão ambiental, mas sim econômica e social, com edifícios que sejam desenhados, construídos e operados para serem otimizados durante o seu ciclo de vida, pelo qual, muitas vezes, tomadores de decisão devem fazer um balanço entre os diferentes requisitos, de forma a ter a melhor solução. Assim, construções sustentáveis devem procurar, do ponto de vista econômico, o acesso equitativo aos recursos; do ponto de vista social, uma qualidade de vida aceitável; e, do ponto de vista ambiental, o uso de recursos de forma balanceada, de forma a proteger o ambiente natural. Para isso, uma das formas recomendadas é a eficiência energética em edifícios, considerando o consumo operacional e a energia incorporada (CIB; UNEP-IETC, 2002).

Dessa forma, abordagens conjuntas com variáveis de sustentabilidade e que incluem o conceito do ciclo de vida nas edificações vêm despertando interesse em pesquisas atuais, algumas focadas em materiais ou componentes construtivos da edificação e outras no consumo energético em edifícios, em especial residenciais. Nesse sentido, Kloepffer (2008) propôs que a avaliação do ciclo de vida para projeto de um produto deveria ser avaliada, considerando o ponto de vista ambiental, econômico e social, tomando como base as metodologias de avaliação do

ciclo de vida ambiental (ACV) e custos no ciclo de vida (CCV) já existentes, considerando-se, ainda, uma avaliação social a ser desenvolvida, propondo, assim, o conceito de avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida ou *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA). Igualmente, iniciativas de normas voluntárias recentes como as que estão sendo criadas pelo Comitê Europeu CEN/TC 350 (*CEN Technical Committee 350*) na abordagem do projeto “Sustentabilidade de trabalhos na construção” buscam o desenvolvimento de métodos normativos horizontais que promovam uma avaliação do desempenho ambiental integrado de edifícios, considerando aspectos ambientais com o uso da ACV, aspectos econômicos com CCV e aspectos sociais.

Nesse sentido, ferramentas e programas computacionais para análises dos desenhos das edificações e avaliações de sustentabilidade que consideram principalmente a avaliação do ciclo de vida, a análise econômica ou a combinação de ambas estão sendo desenvolvidos em vários países. Contudo, a maioria das bases de dados não é acessível e toma como referência os parâmetros dos seus respectivos países de origem. Na mesma linha, pesquisas como as de Ibn–Mohammed et al. (2014), Silvestre, Brito e Pinheiro (2013) e Anastaselos, Giama e Papadopoulos (2009) propõem a integração de parâmetros ambientais ou energéticos junto a econômicos. Nessas abordagens que incluem múltiplas variáveis, a seleção de indicadores para avaliação é fundamental. Igualmente, apresentam-se problemas de decisão quando se conta com vários critérios que devem ser abordados de forma metodológica.

Pesquisas como as de Vučićević et al. (2014), Wang et al. (2010), San–José et al. (2007) e Balcomb e Curtner (2000) são destinadas à avaliação do edifício de forma integral, considerando principalmente a fase de uso e do pré–uso. Critérios e indicadores energéticos e ambientais são os mais presentes, seguidos dos econômicos, com poucas pesquisas abordando critérios sociais. A avaliação do ciclo de vida encontra-se muito presente nessas pesquisas, sendo por vezes avaliados múltiplos impactos ambientais e em muitas delas dando maior atenção somente aos impactos no aquecimento global considerando geralmente como indicador emissões de CO₂ ou CO₂eq. Outras pesquisas consideram somente as questões energéticas, por meio da análise do ciclo de vida energético. Quando foi observada a avaliação de critérios econômicos, a avaliação de custos no ciclo de vida mostrou-se como a metodologia mais aplicada. Embora a avaliação social careça ainda de consenso na sua forma de avaliação, notou-se que tanto algumas pesquisas (RISHOLT;

TIME; HESTNES, 2013) quanto as normativas europeias (CEN/TC 350) colocaram o conforto do usuário dentro da dimensão social de sustentabilidade das edificações. Observa-se também que a questão das mudanças climáticas, em conjunto com análises de ciclo de vida integrada, geralmente não é abordada, sendo considerada importante a abordagem deste tema nesse tipo de análise, pois pode-se ter um grande impacto no desempenho da vida útil da edificação e nas medidas de eficiência energética propostas. De forma similar é o conceito proposto por Georgiadou, Hacking e Guthrie (2012) para os “*future-proofed buildings*”, pois os autores consideram que os métodos estabelecidos de avaliação energética dos edifícios deveriam incorporar abordagens mais holísticas que mostrem adaptação de edifícios no futuro, o que inclui simulação com clima futuro. Entretanto, no estudo dos autores o conceito ficou somente no campo teórico.

No Brasil até a atualidade este tema apresenta muito pouco desenvolvimento. Pode-se dizer que avaliações que consideram vários critérios são observadas nas certificações presentes no país como o LEED, Processo Aqua, BREEAM e Selo Casa Azul, em que são conferidos níveis de desempenho, geralmente global do edifício, em relação a vários parâmetros. Entretanto, o foco é mais na análise ambiental, que considera diversos critérios em várias categorias, sendo geralmente nas categorias de energia, uso de água, implantação, qualidade do ambiente interno e materiais, com destaque para o Selo Casa Azul, que aborda alguns critérios sociais. Contudo, todas essas metodologias na categoria energia são focadas exclusivamente na fase de uso, o mesmo acontece com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) no país, daqui em diante chamado de Etiqueta de Energia.

De forma mais específica, considerando o desempenho termoenergético nas edificações e o ciclo de vida na avaliação, observam-se no Brasil pesquisas com foco quase que exclusivamente na questão ambiental e energética, não sendo constatadas pesquisas com abordagem integrada que englobem a edificação de forma integral incluindo quesitos que levem em conta o tripé da sustentabilidade, embora autores no país como Gomes e Silva (2015) reconheçam que há uma tendência mundial para migrar da avaliação ambiental para uma “avaliação integrada de sustentabilidade” que envolva questões econômicas e sociais.

Observa-se também uma grande deficiência na falta de dados nacionais necessários a esses estudos, em especial relacionados ao ciclo de vida dos materiais e aos impactos, como energia incorporada, emissões

de CO₂ e CO₂ equivalente, entre outros. Entre as pesquisas que foram elencadas, algumas têm se centrado em componentes da edificação, como Bessa (2010), que realizou análises comparativas em três tipos de fachadas de escritórios considerando o desempenho energético e a emissão de CO₂ por meio de simulação computacional e ACV; outras pesquisas, em edificações de forma integral, tais como Munarim (2014), que desenvolveu um método no qual utilizou análise de ciclo de vida com base no conceito de impacto ambiental evitado para avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edificações.

E, mais especificamente para habitações incluindo o setor de habitações de interesse social, destaca-se a pesquisa de Tavares (2006), que propôs uma metodologia de avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) de edificações residenciais brasileiras, considerando a energia e emissões de CO₂ causadas em cada uma das etapas. O seu trabalho também incluiu a proposição de cinco tipologias representativas do setor residencial no Brasil, sendo duas delas de habitação de interesse social (HIS). Entretanto, as áreas estimadas para as HIS não correspondem aos projetos construídos hoje no PMCMV. Por outro lado, Paulsen e Sposto (2013) fizeram uma avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) de um estudo de caso unifamiliar do “Programa Minha Casa, Minha Vida”, considerando exclusivamente como indicadores energia incorporada e operacional; Gomes e Silva (2015) apresentaram indicadores ambientais e energéticos calculados na fase de construção para uma tipologia de edificações de até três pavimentos no país, usando base de dados internacionais ajustados à matriz brasileira. Carminatti Júnior (2012) e Nabut Neto (2011) realizaram estudos de ACVE no sistema de *steel framing*, o primeiro para um projeto de habitação de interesse social e o segundo com foco nas fachadas para Brasília. E mais recentemente, observou-se que na pesquisa de Invidiata e Ghisi (2016a) foi proposta a análise de quatro sistemas de janelas com sombreamento considerando análise energética e econômica no ciclo de vida, com o uso de simulação computacional na fase de uso, para uma residência em Florianópolis.

Outras pesquisas têm se focado mais no estudo das emissões de CO₂. Nesse sentido, Da Costa (2012) propôs um método para quantificação das emissões de carbono dos materiais na construção civil, chamado de QE-CO₂, com base em três níveis de precisão de estimativas, básico, médio e avançado, enquanto Stachera Jr. (2008) relacionou as emissões de CO₂ na fase de construção em uma habitação de interesse social de uma companhia de habitação no Sul do país. Embora a sua pesquisa analise dados de várias fontes, concluiu que há necessidade da

redução das emissões de CO₂, em especial no setor de habitações de interesse social, devido ao impacto em números das construções desse setor. Por outro lado, Kuhn (2006) realizou uma avaliação ambiental e econômica dos subsistemas e dos materiais de um protótipo de habitação de interesse social mais sustentável. O método de avaliação tomou como base critérios e pontuações com dados quantitativos e qualitativos, não sendo usado ACV por falta de dados.

Conforme levantado, com exceção de poucas pesquisas que consideraram indicadores ambientais e econômicos, os estudos anteriores no Brasil foram focados quase que exclusivamente em indicadores de energia e/ou ambientais. Igualmente a maioria realizaram a análise de casos únicos, sendo poucos os que incluíram a proposição de incorporação de medidas de eficiência energética para comparação. Com relação à energia operacional, poucos estudos para o setor residencial abordaram o uso de simulações termoenergéticas em conjunto com os estudos de ACV/ACVE. E finalmente, não foram observadas pesquisas com incorporação das alterações previstas no clima de maneira integrada, de forma a representar o ciclo de vida da edificação.

Portanto, considerando o impacto e o crescimento do setor de habitações de interesse social, é imperativo estudar mais a fundo o setor para alcançar os objetivos propostos no Brasil com relação ao consumo de energia, a emissões de CO₂ e ao equilíbrio no uso de recursos necessários ao planeta. Para isso, é importante caracterizar e analisar, de maneira mais holística, o impacto do que está sendo construído e criar uma base para melhorias e tomada de decisão, com habitações propostas, que considerem o desempenho termoenergético com menor impacto em longo prazo para o país.

Levando em conta que o uso da energia apresenta-se como um dos principais temas a serem abordados no panorama atual do setor de habitações do país, abordagens integradas de sustentabilidade no ciclo de vida com o uso de simulação computacional e foco no desempenho termoenergético podem dar a base de como reduzir o uso da energia na edificação, considerando impactos e benefícios em longo prazo. Dessa forma, considera-se imprescindível a introdução dos conceitos de ciclo de vida e mudanças climáticas diante de uma abordagem mais holística no uso de energia nas edificações, em especial para os programas de habitações de interesse social no país. Os benefícios ambientais e energéticos podem ser vistos para obter melhor desempenho térmico na edificação e maior eficiência energética, levando em conta o comportamento climático atual e futuro, o que pode evitar ou reduzir o

uso posterior de condicionamento ambiental através de menor consumo energético e, ainda redução das emissões de CO₂ na fase operacional. Todavia, por vezes, isso pode implicar em maior energia ou emissões de CO₂ incorporadas nas edificações, para o qual, a análise do ciclo de vida energético pode mostrar a melhor relação. O benefício social pode ser visto, neste caso, em função do bem-estar do usuário, relacionado a um maior conforto térmico na habitação operando com ventilação natural; e o benefício econômico, como a redução do consumo energético na operação na edificação, pensando no custo ao longo do ciclo de vida. Dessa forma, tendo como foco o desempenho termoenergético e o conceito do ciclo de vida na edificação, poderiam ser analisados ou exigidos diferentes parâmetros dentro de programas nacionais de habitação de interesse social. Nesse sentido, levantaram-se as seguintes perguntas de pesquisa:

Qual é o desempenho atual dos projetos recentes de habitações de interesse social com relação ao seu ciclo de vida energético e a previsões de mudanças climáticas? E quais são e como analisar impactos que incluam aspectos do tripé da sustentabilidade para a incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos de habitação de interesse social no Brasil, considerando o ciclo de vida das edificações e as mudanças climáticas com foco no desempenho termoenergético da edificação?

1.1 OBJETIVOS

A seguir são colocados os objetivos geral e específicos da pesquisa.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação da incorporação de medidas de eficiência energética em projetos de habitação de interesse social no Brasil por meio de uma abordagem integrada no ciclo de vida com adaptação às mudanças climáticas que considere aspectos da sustentabilidade e foco no desempenho termoenergético do edifício.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos previstos no trabalho são:

1. Definir projetos representativos de habitações de interesse social que são construídas na atualidade no Brasil e avaliar o seu desempenho termoenergético.

2. Avaliar a influência das mudanças climáticas no comportamento termoenergético de edificações de interesse social ao longo da sua vida útil, considerando a incorporação de medidas de eficiência energética em duas cidades.

3. Estabelecer uma abordagem integrada que considere indicadores relacionados ao desempenho termoenergético da edificação nos aspectos ambiental e energético, econômico e de conforto térmico do usuário considerando o ciclo de vida energético e mudanças climáticas.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

No primeiro capítulo é introduzido o tema da pesquisa, sua justificativa, relevância e objetivos geral e específicos. A seguir, é apresentado o setor de HIS por meio do “Programa Minha Casa, Minha Vida” como objeto de estudo. No terceiro capítulo é apresentada a revisão de literatura que serviu de embasamento para a abordagem proposta. A revisão de literatura foi composta inicialmente pelos temas: sustentabilidade e conceito de ciclo de vida das edificações e, mudanças climáticas e sua relação com o consumo energético operacional nas edificações. Finalmente foram levantadas pesquisas que usaram abordagens integradas no ciclo de vida das edificações com foco no desempenho termoenergético. No capítulo quatro mostra-se uma introdução ao método da pesquisa o qual foi dividido em três etapas. Os três capítulos seguintes correspondem a cada uma das etapas da pesquisa. Em cada capítulo é apresentado de forma mais específica sua metodologia, resultados e considerações finais. Assim, o capítulo quinto apresenta a metodologia e os resultados da primeira etapa correspondente à elaboração de projetos de edificações representativas do PMCMV e sua análise termoenergética, e define a tipologia a ser analisada nas duas etapas seguintes. O sexto capítulo aborda o método e os resultados da incorporação das medidas de eficiência energética para adaptação no projeto representativo, avaliado frente às mudanças climáticas. A avaliação com relação ao desempenho termoenergético do edifício foi realizada por meio de simulação termoenergetica considerando o uso de arquivos climáticos futuros na fase de operação da edificação. O sétimo capítulo exibe o método e os resultados da abordagem integrada proposta para avaliação da incorporação das medidas de eficiência energética no

projeto, considerando o ciclo de vida energético da habitação e, as mudanças climáticas. Os resultados são mostrados para duas cidades. O oitavo capítulo apresenta as conclusões, as limitações da pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros. Por último, são exibidas as referências, os apêndices e os anexos, com dados considerados relevantes para complementar os resultados mostrados.

2. OBJETO DE ESTUDO – O SETOR DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL BRASILEIRO: PROJETOS NO “PROGRAMA MINHA CASA, MINHA VIDA”

O presente capítulo tem como finalidade mostrar um panorama atual do setor residencial de habitação de interesse social no Brasil, em especial do “Programa Minha Casa, Minha Vida”, objeto de estudo deste trabalho. O foco é dado nas questões relacionadas ao uso da energia nas habitações, buscando um maior entendimento sobre o tema e a inserção de definições que serão tratadas ao longo da pesquisa.

2.1 CONTEXTO

No início da Ditadura Militar, em 1964, foi criado o Banco Nacional de Habitação (BNH), que passou a construir unidades habitacionais no país para a população de baixa renda, porém com uma arquitetura padronizada e desqualificada. Dessa forma, foi criada uma diferenciação entre as habitações orientadas por profissionais da área e as padronizadas (BRASIL, 2007a), sofrendo com isso uma perda na qualidade, devido à racionalização no setor, principalmente por conta do controle de custos (UNEP, 2010a).

As Companhias de Habitação Popular (COHABs) e os Agentes Públicos de Habitação foram criados a partir da Lei Federal nº 4.830, de 21 de agosto de 1964, como integrantes do Sistema Financeiro da Habitação (SFH) com o objetivo de buscar soluções para a questão habitacional brasileira. Sendo apoiados pelo BNH, foram concebidos para atuar como financiadores e/ou promotores, vinculados aos municípios e estados. Os recursos do setor, destinados prioritariamente à população de mais baixa renda, são principalmente vindos do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), mantido pela contribuição mensal obrigatória vinda dos trabalhadores formais. As COHABs uniram-se a partir de 1974 na Associação Brasileira de COHABs e Agentes Públicos de Habitação (ABC) para tratar as questões relacionadas ao SFH, de forma articulada. Conforme a ABC, conta-se hoje com 29 companhias de habitação e agentes financiadores em 17 estados brasileiros (ABC, 2016).

2.2 O PROGRAMA MINHA CASA, MINHA VIDA

O programa “Minha Casa, Minha Vida” lançado em 2009 como uma das medidas para suprir o deficit habitacional, tem até o momento três fases, tendo a última iniciado no primeiro semestre de 2016. Na

primeira fase, foram contratadas um milhão de habitações para famílias entre zero e dez salários mínimos. Na segunda fase, foi trocado o limite de salários, ajustados a valores fixos por faixas de renda; sendo para habitações urbanas, a Faixa 1 para famílias com renda familiar total de até R\$ 1.600; a Faixa 2 de até R\$ 3.275,00; e a Faixa 3 entre R\$ 3.275,01 até R\$ 5.000 (BRASIL, 2013b). Na sua terceira fase, segundo dados do governo (BRASIL, 2016a), o Programa pretende construir mais duas milhões de habitações até 2018. Teve algumas alterações que buscaram a melhoria de habitações e empreendimentos que estão sendo executados, mas de forma geral manteve formato e tipos de subsídios muito similares aos oferecidos na Fase 2, embora com alguns ajustes de valores e requisitos. Entre as diferenças observadas, os valores da Faixa 1 foram para até R\$1.800,00 de renda familiar; propôs a implementação de uma nova faixa intermediária entre a Faixa 1 e a 2, “Faixa 1,5”, para dar subsídio às famílias com renda até R\$ 2.350,00; a Faixa 2 ficou entre R\$ 2.351,00 e 3.600,00; e a Faixa 3 acima de R\$ 3.600,00 e até R\$ 6.500,00 de renda familiar. Atualmente, indicam-se 4,21 milhões de unidades contratadas e 2,6 milhões de unidades entregues (BRASIL, 2016b). Ainda mais, a atual situação financeira do país alterou um pouco algumas condições do Programa, mas de forma geral, oferece facilidades, quais sejam: descontos, subsídios e redução do valor de seguros habitacionais (BRASIL, 2013b).

A pesquisa foi realizada enquanto estava vigente a Fase 2 do Programa. Dessa forma, descrevem-se aqui inicialmente as características dessa fase e apresentam-se em seguida algumas alterações relevantes que são consideradas na fase atual. Na Fase 2, para habitações urbanas de famílias na Faixa 1, a aquisição de imóveis foi realizada pelo Fundo de Arrendamento Residencial (FAR), pelo Fundo de Desenvolvimento Social (FDS) ou pela Oferta Pública⁴ em parceria com o Poder Público (estados e municípios). Famílias com renda de até R\$ 5.000,00⁵ foram divididas em dois grupos: famílias com renda de até R\$3.275,00 sendo prioritárias e tendo subsídio de financiamentos com recursos do FGTS; e famílias com renda de até R\$ 5.000 com acesso dado pelo Fundo Garantidor da Habitação (BRASIL, 2013b). De forma geral, as companhias de habitação e agentes públicos atendem famílias com renda total de até três salários mínimos, o que representa a Faixa 1 e parte da

⁴ Para famílias com renda mensal na Faixa 1 que estejam em municípios com população de até 50.000 habitantes.

⁵ Como referência o valor do dólar comercial para venda apresentou média anual de R\$ 2,148 em 2013; R\$ 2,353 em 2014 e R\$ 3,33 em 2015.

Faixa 2, porém a prioridade é para a Faixa 1. Famílias com renda total superior a três salários mínimos e até R\$ 5.000 são atendidas principalmente por empresas privadas e/ou empreendedores isolados.

Os valores das unidades, subsídios e taxas de juros variam dependendo do Programa e Faixa, sendo menores valores por unidade, com maior subsídio para famílias na Faixa 1. Para habitações na Faixa 2 e 3, a subvenção e valor máximo por unidade depende da localidade.

Na terceira fase do Programa os limites dos valores foram distribuídos por região e tamanho do município. De forma geral, observa-se que atualmente os maiores valores correspondem aos estados do Distrito Federal, Rio de Janeiro e São Paulo, enquanto os menores valores às regiões do Norte e do Nordeste (BRASIL, 2016b).

Entre os critérios de priorização dos projetos para o Programa está o “menor valor de aquisição das unidades habitacionais”, conforme colocado no Anexo I da Portaria nº 465, de 3 de outubro de 2011; que dispõe sobre as diretrizes dentro do Programa Nacional de Habitação Urbana (PNHU) para projetos no PMCMV com recursos do FAR para a Faixa 1 (BRASIL; MINCIDADES, 2011b). A Tabela 1 mostra as especificações mínimas exigidas para os projetos na Faixa 1 com base em Brasil (2013b).

Tabela 1 – Especificações mínimas para Faixa 1 conforme o aporte de recursos.

TIPOLOGIA	FONTE DE RECURSOS								
	FAR				FDS				OFERTA PÚBLICA
	casa térrea	casa térrea	apto/casa sobreposta/ sobrado	apto/casa sobreposta/ sobrado	casa/sobrado	casa/sobrado	apartamento/ casa sobreposta/ sobrado	apto/ casa sobreposta/ sobrado	casa p/ municípios até 50 mil habitantes
Área útil (m ²)	36	32	39	37	32	38	37	42	36
Ambientes: sala, 1 quarto p/casal, 1 quarto p/ 2 pessoas, cozinha, circulação, banheiro	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 1 (continuação)

TIPOLOGIA	FONTE DE RECURSOS								
	FAR				FDS				OFERTA PÚBLICA
	casa térrea	casa térrea	apto/casa sobreposta/ sobrado	apto/casa sobreposta/ sobrado	casa/sobrado	casa/sobrado	apartamento/ casa sobreposta/ sobrado	apto/ casa sobreposta/ sobrado	casa p/ municípios até 50 mil habitantes
Área de serviço (Externa =E; Interna=I)	E	E	I	I	E	E	I	I	E
Dimensões dos cômodos: em função dos móveis circulação mínima de 50 cm entre mobiliário e paredes e em frente às portas de 1,20m.	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pé direito: 2,30 m no bwc e 2,50 m nos demais cômodos	X		X			X		X	X
Pé-direito: conforme lei municipal ou NBR 15575		X		X	X		X		
Cobertura: telha cerâmica/concreto com forro ou fibrocimento (mín. 5mm) com laje sobre estrutura de madeira ou metálica	X	X			X	X			Telha cerâmica, sobre estrutura de madeira/ metálica, ou desempenho equivalente.

Tabela 1 (continuação)

TIPOLOGIA	FONTE DE RECURSOS								
	FAR				FDS				OFERTA PÚBLICA
	casa térrea	casa térrea	apto/casa sobreposta/ sobrado	apto/casa sobreposta/ sobrado	casa/sobrado	casa/sobrado	apartamento/ casa sobreposta/ sobrado	apto/ casa sobreposta/ sobrado	casa p/ municípios até 50 mil habitantes
Cobertura: laje, em telha cerâmica ou de fibrocimento (mín.5 mm), com estrutura de madeira ou metálica. Ou laje inclinada com telhas			X	X			X	X	
Revestimento interno: massa única gesso (exceto áreas molhadas) ou concreto regularizado para pintura	X	X	X	X	X	X	X	X	Pintura sobre reboco ou gesso*
Revestimento externo: massa única ou concreto regularizado para pintura	X	X	X	X	X	X	X	X	Revestimento texturizado ou pintura acrílica sobre reboco *
Paredes internas: tinta PVA	X	X	X	X	X	X	X	X	
Paredes externas: tinta acrílica ou textura impermeável	X	X	X	X	X	X	X	X	
Tetos: tinta PVA	X	X	X	X	X	X	X	X	
Portas internas: madeira ou metálica no acesso	X	X	X	X	X	X	X	X	Madeira ou metálica
Janelas: alumínio em regiões litorâneas e aço para outras	X	X	X	X	X	X	X	X	Aço ou madeira

Tabela 1 (continuação).

TIPOLOGIA	FONTE DE RECURSOS								
	FAR				FDS				OFERTA PÚBLICA
	casa térrea	casa térrea	apto/casa sobreposta/ sobrado	apto/casa sobreposta/ sobrado	casa/sobrado	casa/sobrado	apartamento/ casa sobreposta/ sobrado	apto/ casa sobreposta/ sobrado	casa p/ municípios até 50 mil habitantes
Vão das janelas: 1,50 m ² para os quartos e 2 m ² para salas c/ variação de 5%	X		X			X		X	1,20 m ² nos qtos e 1,50 m ² na sala, variação até 5%
Piso: cerâmica	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ampliação: deve ser prevista no projeto	X	X			X	X			X
Vagas de garagem: conforme legislação	X	X	X	X	X	X	X	X	
Tomada para chuveiro elétrico	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Elevador: espaço previsto na planta e informado no manual do proprietário			Para edif. acima de 2 pavtos.					Para edif. acima de 2 pavtos.	
Tecnologias inovadoras: aceitas se aprovadas, conforme NBR 15575, e homologadas pelo SINAT ou com desempenho satisfatório junto à CAIXA	X	X	X	X	X	X	X	X	

Tabela 1 (continuação).

TIPOLOGIA	FONTE DE RECURSOS								
	FAR				FDS				OFERTA PÚBLICA
	casa térrea	casa térrea	apto/casa sobreposta/ sobrado	apto/casa sobreposta/ sobrado	casa/sobrado	casa/sobrado	apartamento/ casa sobreposta/ sobrado	apto/ casa sobreposta/ sobrado	casa p/ municípios até 50 mil habitantes
Sustentabilidade: medição individualizada de água e gás ou botijão individualizado					X	X	Gás sem opção de botijão individual	Gás sem opção de botijão individual	
Aquecimento solar: obrigatório em todas as regiões com sistema aprovado pelo Inmetro	X		Para sobrado			X			

Fonte: base em Brasil (2013b).

Nas informações da Portaria em referência não são observadas especificações com relação a estratégias de eficiência energética para os projetos da Faixa 1 ou exigidos parâmetros de desempenho da habitação, considerando-se as necessidades climáticas específicas do local para a especificação da envoltória. Também não é observado exigência de comprovação de desempenho térmico ao longo do tempo, impacto dos materiais usados ou conforto do usuário. Em relação à sustentabilidade, apenas são colocados itens como medição individualizada de água e gás, e somente se observa a obrigatoriedade do uso de aquecimento solar nos projetos de casas térreas de 36 m², ofertado pelo FAR, e de casas e sobrados de 38 m², pelo FDS. Observam-se algumas diferenças nos requisitos exigidos, conforme a fonte de recursos, que podem afetar o desempenho termoenergético das habitações. Contudo, não são observadas diferenças significativas com relação à área de piso ou ao número e dimensões dos ambientes. Porém, cabe ressaltar que a partir de 2013, quando foi aprovada a norma de desempenho mínimo (NBR 15575), ela deveria também ser aplicada para habitações do setor, o que

nem sempre tem se verificado. Entretanto, recentemente e na Fase 3 do Programa foram colocadas novas exigências para os empreendimentos e as habitações com o objetivo de garantir melhor desempenho termoenergético nas habitações e maior sustentabilidade nos empreendimentos, sendo exigido desempenho com relação à NBR 15575 para os projetos apresentados ao Programa, embora ainda no nível mínimo (BRASIL; MINCIDADES, 2016).

Nos projetos das Faixas 2 e 3 são comumente usados os recursos do FGTS. As normativas referentes à aplicação desses recursos indicam como diretrizes de projeto questões mais gerais como projetos que apresentem acessibilidade, conforme contido na legislação, compatibilidade com o plano diretor ou similar, atendimento às normas de preservação ambiental, atendimento às posturas municipais quanto à qualidade da edificação, previsão, se possível de ampliação do projeto e participação de empresas que detenham o Certificado de Conformidade, do Sistema de Avaliação da Conformidade de Serviços e Obras (SiAC), integrante do Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat – PBQP-H (BRASIL; MINCIDADES, 2012a). E, ainda, a Portaria 363 de 2011 (BRASIL; MINCIDADES, 2011a) indica que nas habitações pagas com recursos do FGTS é permitido o uso de novas tecnologias construtivas sempre que estiverem em conformidade com a ABNT e homologadas junto ao Sistema Nacional de Avaliação Técnica (SINAT) do PBQP-H. Indica também que devem ser asseguradas condições de sustentabilidade das construções, mas, a Normativa não especificava de que forma. Em 2015, divulgou-se uma notícia considerada um avanço em prol da sustentabilidade com a divulgação da definição de critérios para aplicação de diretrizes sociais e ambientais para habitações do PMCMV financiadas com recursos do FGTS (CAIXA, 2015). Entre as medidas recomendadas relacionadas à eficiência energética e possíveis de serem financiadas estão sistemas de energia renovável, como aquecimento solar e sistemas de micro-geração de eletricidade e telhados brancos para edifícios multifamiliares, entre outros. Igualmente, pode ser dado um incentivo para a participação dos projetos em processos de certificação ambiental nacionais.

Contudo, o resultado da política habitacional praticada até o momento é de que projetos muito similares são executados no país, tanto perante tipologias de formas arquitetônicas quanto especificação de materiais. Essa condição é especialmente válida para as faixas de renda menores, em que atuam as companhias de habitação, conforme observado

na Figura 2 de casas unifamiliares, assim como na Figura 3 de edificações multifamiliares, todas em diferentes localidades do país.

Figura 2 - Projetos de casas unifamiliares das Companhias de Habitação.



a) Projeto da casa de 42 m² da Cohab SC
Fonte: Projeto enviado pela COHAB SC.



b) Projeto casa 6C da AGEHAB
Fonte: Projeto enviado pela AGEHAB.



c) Casas Cohab do estado do Pará
Fonte: COHAB Pará (2013).

Figura 3 - Projetos de casas unifamiliares das Companhias de Habitação.



a) Edificações do PMCMV no município de Camaçari, Bahia
Fonte: Ação Notícias (2013).



b) Condomínio residencial de Cohab Ribeirão Preto, SP
Fonte: ISO Construções (2013).



c) Apartamentos para o PMCMV pela Cohab Curitiba
Fonte: Cohab Curitiba (2010).

Em contraposição a isso, projetos no Brasil deveriam responder a diversas necessidades climáticas. A NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) dividiu o país em oito zonas bioclimáticas. A Zona 1 inclui climas na parte Sul do país, com maior necessidade de aquecimento; as zonas 2 e 3, especialmente no Sul e no Sudeste, têm requerimentos similares para o verão e o inverno; as zonas 4, 5 e 6 têm necessidades de estratégias para o verão e o inverno, mas as diferenças entre elas são menos pronunciadas do que nas zonas anteriores; as zonas 7 e 8, localizadas principalmente no Norte e no Nordeste do país, precisam de estratégias somente para o verão (CAIXA, 2010). A NBR 15575 (ABNT, 2013), que estabeleceu requisitos de desempenho mínimo para edifícios habitacionais, aborda critérios de desempenho térmico, conforme as zonas bioclimáticas estabelecidas pela NBR 15220-3.

Não obstante, conforme Carvalho (2013), o *business as usual*, mantido até agora com o domínio do menor preço, tem resultado em habitações com baixa qualidade que se repetem diversas vezes nos terrenos, sem oferta de áreas livres, preocupação urbana ou de sustentabilidade. Nesse sentido, pesquisas nacionais têm mostrado, de forma geral, baixo desempenho térmico e desconforto dos usuários nos projetos do setor. Entre eles, o projeto da Rede Nacional de Pesquisa sobre uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social, projeto patrocinado pela Finep com a participação de diversas universidades no Brasil, abordou temas que incluíram a criação de protótipos de habitações de interesse social para simulação computacional, comportamento do usuário, posse e uso de equipamentos elétricos, avaliação do desempenho térmico e proposição de estratégias de eficiência energética para o setor. A amostra foi composta por habitações de interesse social existentes, mas não necessariamente limitadas ao PMCMV. Como parte desse projeto o estudo de Almeida (2014) avaliou a envoltória de 50 habitações de interesse social da região de Florianópolis usando o método de simulação da Etiqueta de Energia nacional que classifica as edificações entre níveis que vão de A até E, sendo A o melhor nível de desempenho. No estudo foi verificado a classificação final da envoltória para 58% das habitações sendo nível E. Schaefer e Ghisi (2012) desenvolveram também para esse projeto, um modelo representativo de habitações de interesse social existentes na Grande Florianópolis para ser usado em simulações computacionais com base em valores médios de edificações levantados a partir das características mais recorrentes encontradas. Inicialmente, foram levantados dados de dez edificações. Posteriormente em um trabalho de Schaefer et al. (2012) foi aprimorado o trabalho anterior e levantados dados de 30 habitações, obtendo como resultado dois modelos de tipologias para o setor de HIS da Grande Florianópolis, divididos em duas faixas de renda, conforme os parâmetros do PMCMV: Renda 1, considerando até R\$ 1.600,00 de renda familiar; e Renda 2, entre R\$ 1.600,00 e R\$ 5.000,00. Os dados foram tratados com métodos estatísticos verificando valores médios, desvio padrão e intervalo de confiança. Esses projetos são uma amostra do que está construído no setor de HIS da Grande Florianópolis, porém não necessariamente o que está sendo aprovado no PMCMV, até porque a amostra representa edificações já construídas, não necessariamente dentro do Programa. Igualmente, o modelo representativo para a Renda 1 apresentou somente um quarto, fora do exigido no PMCMV. Contudo, posteriormente os mesmos autores

apresentaram em Schaefer e Ghisi (2016) um aprimoramento do método proposto onde usaram análise de clusters. Com uma amostra de 103 casas unifamiliares de baixa renda construídas em Florianópolis, chegaram a dois modelos representativos, sendo um de 76m² com três quartos e um de 37m² com dois quartos. Dessa vez, o modelo de 37m² está mais perto da área e características propostas pelo PMCMV para essa tipologia. Entretanto foi observado que não contempla questões de acessibilidade. Porém, esse fato era esperado por representar tipologias de habitações de baixa renda já construídas, mas não necessariamente construídas dentro do PMCMV, como colocado anteriormente.

Por outro lado, outras pesquisas realizadas tanto no Norte quanto no Sul do país têm abordado o estudo do desempenho termoenergético das habitações que estão sendo propostas para o PMCMV, assim como a avaliação do desempenho de novos sistemas construtivos. No geral, têm concluído que as habitações apresentam baixa qualidade arquitetônica e baixo desempenho térmico, desconforto do usuário e inadequação climática (LINCK, DE ALBERNARD; GRIGOLETTI, 2013; SILVA, DE PAULA; BARBIRATO, 2013).

Na região Sul, Triana e Lamberts (2013) avaliaram o desempenho térmico do projeto da casa mínima de 36 m² da Companhia de Habitação do Estado de Santa Catarina, verificando o baixo desempenho térmico, em especial, em relação ao verão, em que, considerando os graus-hora da temperatura operativa dos ambientes de longa permanência, foi equivalente ao nível D da Etiqueta Nacional de Energia. Igualmente, foi verificado que a tipologia não atendia aos requisitos da NBR 15220-3. O estudo realizado para a zona bioclimática 3 analisou também a incorporação de estratégias bioclimáticas e de eficiência energética para a melhoria do desempenho térmico com baixo custo, considerando estratégias em relação à ventilação, ao sombreamento e ao isolamento da cobertura. Por outro lado, o estudo de Pires et al. (2013) avaliou a influência da forma arquitetônica para uma edificação multifamiliar de interesse social padrão, com planta em formato “H”, construída em Porto Alegre. Os resultados mostraram desconforto nos modelos avaliados através do indicador de graus-hora, tendo a variação das formas da planta pouca alteração entre os resultados dos modelos analisados.

A falta de qualidade arquitetônica e o baixo desempenho mostrado nos projetos do setor estão levantando uma série de questionamentos. Carvalho (2013) entrevistou vários profissionais arquitetos do mercado atuantes no setor, os quais levantaram a importância de um novo debate em relação ao PMCMV sobre qualidade das residências que estão sendo

construídas, o que para eles deveria ser considerado tão importante quanto diminuir o déficit habitacional. Os arquitetos entrevistados veem o Programa como uma oportunidade para novas habitações, especialmente no setor privado. Porém, deve ser dado o valor adequado aos projetos de arquitetura e assegurada a qualidade arquitetônica, urbanística e ambiental das propostas apresentadas. Dessa forma, segundo opinião do arquiteto Nabil Bonduki, o problema habitacional seria encarado por uma visão de longo prazo.

Pesquisas como as de Kowaltowski e Granja (2011) e Kowaltowski et al. (2006) têm levantado questões de sustentabilidade e possíveis alterações nos projetos, tidas como importantes pelos usuários de habitações de interesse social. Nesse sentido, a publicação da Caixa e Giz sobre os benefícios para a aplicação do Selo Casa Azul nas categorias de eficiência energética e de projeto e conforto elaborado por Triana e Ghisi (2013) teve como objetivo mostrar os benefícios energéticos e econômicos, proporcionados aos usuários e aos empreendedores quando da adoção dos critérios requeridos pelo Selo Casa Azul nessas categorias. Para isso foram mostrados benefícios das ações na operação da edificação, de forma quantitativa e com os custos de implementação das medidas sugeridas.

Também, têm-se ações isoladas para a melhoria dos projetos do setor de habitação de interesse social, algumas fora do âmbito do Programa “Minha Casa, Minha Vida”, com estudo de novas tipologias, como no projeto Serra do Mar do conjunto Rubens Lara da Companhia de Habitação CDHU. Esse empreendimento foi eleito pelo projeto “Sustainable Social Housing Initiative (SUSHI)” da UNEP como estudo de caso para iniciativa de desenvolvimento de habitação social com sustentabilidade (Figura 4). O projeto SUSHI do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), realizado em parceria com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) e instituições como a Caixa Econômica Federal, a Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo (CDHU), a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Estadual de Campinas e Fábio Feldmann Consultores (UNEP, 2010a), teve o objetivo de organizar, mapear e definir tecnologias essenciais a serem incorporadas no processo de concepção da habitação de interesse social no Brasil, considerando todos os agentes envolvidos. O relatório final do projeto (UNEP, 2010b) apresentou diretrizes para a definição de uma agenda para os empreendimentos de HIS baseada na inserção de ações sustentáveis, com

foco em soluções para melhorar a eficiência energética. As diretrizes indicadas foram: a adoção de estratégias para o projeto conforme o zoneamento bioclimático brasileiro; uso de aquecimento solar de água; o fornecimento de equipamentos e eletrodomésticos eficientes; uso de forro e/ou barreiras radiantes/isolamento na cobertura; uso de coberturas com baixa absorvância solar; uso de esquadrias e sombreamento das esquadrias; uso de energia fotovoltaica; a necessidade de medição remota de insumos energéticos; uso de sombreamento natural, telhado verde, aquecimento de água a gás e altura adequada do pé-direito (JOHN et al., 2011).

Figura 4 - Projeto Rubens Lara da CDHU.



a) Aquecimento solar
Fonte: Deangelo Fotos (2010).



b) Tipologias
Fonte: Carvalho (2013).

Igualmente é o caso do concurso público de Arquitetura, promovido em 2010 pela CDHU, CBCS e IAB/SP – Habitação para todos – Concurso Nacional de Projeto de Arquitetura de Novas Tipologias para Habitação de Interesse Social Sustentáveis – que buscava novos projetos que considerassem a sustentabilidade ambiental, econômica, urbanidade e acessibilidade. Os projetos foram divididos em seis categorias: casas térreas, casas escalonadas, sobrados, edifícios de três pavimentos, edifícios de quatro e cinco pavimentos e edifícios de seis e sete pavimentos (IAB-SP, 2010). Os projetos ganhadores de algumas categorias são mostrados na Figura 5. No entanto, esses projetos não foram colocados em prática até o momento.

Figura 5 - Projetos para habitação de interesse social resultados de concurso do IAB-SP.



a) Grupo 1: Casas térreas

b) Grupo 2: Casas escalonadas

c) Grupo 5: Edifícios de quatro pavimentos

Fonte: IAB-SP (2010).

Outras propostas de intervenções no setor que buscam um diferencial com iniciativas que proporcionem maior conforto ao usuário, como ventilação cruzada, tetos jardins, uso de aquecimento solar, entre outras, podem ser observadas na Figura 6. Entretanto, não foi observada a colocação dos custos nos projetos ou a comprovação dos reais benefícios que estão sendo alcançados com essas novas propostas, o que se considera necessário.

Figura 6 - Projetos de habitações de interesse social.



a) Projeto⁶ de casa de 50 m²

Fonte: Carvalho (2013).

b) Projeto multifamiliar⁷

Fonte: Carvalho (2013).

⁶ Conjunto projetado por Fernando Forte, Lourenço Gimenes e Rodrigo Marcondes, em Lins. Possui jardim linear e pontos de ventilação cruzada.

⁷ Conceito “Singular” do escritório EB–A de Gláucio Gonçalves e Marcos E. da Silva usa pátio interno, telhado verde, bambú na fachada, aquecimento solar e modulação na alvenaria, entre outras estratégias.

Pode ser observado que, de forma geral, as exigências colocadas nos projetos do PMCMV, especialmente no setor de menor renda, embora com uma melhoria observada na última fase do Programa, estão ainda aquém do que seria necessário em termos de diretrizes de sustentabilidade, conceito do ciclo de vida da edificação e qualidade arquitetônica. E mesmo que o objeto de estudo esteja centrado na edificação, entende-se que os programas de habitações de interesse social devem representar muito mais do que simplesmente o edifício, contemplando critérios de inserção urbana, acessibilidade e cultura, entre outros. O programa oferece uma oportunidade de pensar, projetar e construir arquitetura desde uma perspectiva diferente a que está sendo usada até o momento, na qual tende a predominar o menor custo inicial e a quantidade de habitações no lugar da qualidade das mesmas. Considera-se assim necessário que os projetos de edificações presentes no Programa sejam avaliados considerando outras premissas, entre elas o desempenho termoenergético da edificação em longo prazo considerando diversas variáveis em relação a ele. Desta forma, a continuidade do Programa deveria estar pautada em novas exigências que mostrem maior conforto do usuário a longo prazo e um uso racional de recursos para o país com economia para os usuários, onde premissas econômicas iniciais não determinem a escolha dos projetos. Projetos devem ser pensados a futuro, considerando a vida útil da edificação, pois de outra forma, esta-se deixando um passivo que deverá ser melhorado no futuro, com maior custo para o país e os usuários.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura buscou delinear considerações sobre a ligação entre o conceito do ciclo do vida, sustentabilidade e mudanças climáticas, relacionando-os ao uso da energia nos projetos do setor residencial de interesse social na busca por uma abordagem mais holística. Inicialmente, são apresentados conceitos de sustentabilidade e ciclo de vida aplicado às edificações. Nesse contexto é introduzida a metodologia de análise do ciclo de vida, com foco no uso da energia em edificações, como parâmetro ambiental, que inclui a energia operacional e sua relação com o contexto brasileiro de habitação de interesse social. Em seguida, é realizada uma revisão sobre o conforto térmico do usuário e posteriormente, é introduzida a metodologia de custos no ciclo de vida com enfoque nas edificações. No item seguinte, é abordada a temática de mudanças climáticas e sua interação com simulação termoeenergética dos projetos, assim como a importância das medidas de eficiência energética para adaptação, do setor. Por último, são elencadas pesquisas com abordagens conjuntas do uso da energia em edificações.

3.1 SUSTENTABILIDADE E CONCEITO DO CICLO DE VIDA NAS EDIFICAÇÕES

Na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), realizada no Rio de Janeiro, em 1992, conhecida como Eco-92, os países comprometeram-se com o desenvolvimento com base na análise do ciclo de vida dos materiais; o desenvolvimento de matérias-primas e, energias renováveis e a redução de materiais e energia usados na extração de recursos naturais, na exploração e destruição ou na reciclagem dos resíduos. Dessa reunião, surgiu a Agenda 21, que buscou dar pautas para o desenvolvimento dos países. E, posteriormente, ligadas especificamente à área da construção civil, surgiram a Agenda 21 para construções sustentáveis (CIB, 2000) e a Agenda 21 para construções sustentáveis em países em desenvolvimento (CIB; UNEP, 2002). Esta última relacionou o desenvolvimento sustentável ao do ciclo de vida. Ainda mais, recentemente, a UNEP divulgou os objetivos do desenvolvimento sustentável, um conjunto de 17 objetivos e 169 alvos a serem alcançados até 2030, entre os quais inclui fazer cidades e assentamentos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, sendo novamente reforçado o conceito

do ciclo de vida como uma das formas de reduzir a pressão sobre os recursos naturais (UNEP, 2015).

3.1.1 Avaliação do ciclo de vida

Como forma de ver o impacto ambiental ligado ao ciclo de vida de produtos e serviços surge a avaliação ou análise do ciclo de vida. A avaliação do ciclo de vida tem como objetivo compreender os impactos ambientais associados aos produtos, tanto na fabricação quanto no consumo e está fundamentada na ISO 14040 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura (ABNT, 2009a) e na ISO 14044 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações (ABNT 2009b). Enfoca tanto os aspectos ambientais quanto os impactos ambientais potenciais considerando todo o ciclo de vida de um produto, que inclui a aquisição de matérias-primas, a produção, o uso, o tratamento pós-uso, a reciclagem até a disposição final (do berço ao túmulo) (ABNT, 2009a). Pode ser usada para avaliações comparativas sobre desempenho ambiental de produtos como ajuda na tomada de decisão. E o seu estudo é composto de quatro fases que incluem: definição de objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e interpretação (ABNT, 2009a).

Na ACV é necessária a definição da unidade funcional que fornece uma referência a cujas entradas e saídas são relacionadas, importante para a comparabilidade dos resultados com uma base comum. A ACV se compõe de processos elementares nos quais são consideradas as fases do ciclo de vida. Apresenta uma fronteira de estudo definida, conforme o nível de detalhamento requerido, sendo colocadas as entradas (produtos e/ou fluxos elementares que incluem o uso de recursos) e as saídas geradas (emissões para o ar, a água e o solo, associados ao sistema) (ABNT, 2009a).

Existem diversos métodos de avaliação de impacto, cada um dos quais apresenta categorias de impacto com diferentes indicadores. Na ACV os indicadores podem ter um processo de normalização para chegar a obter um indicador final único. Entre os métodos de avaliação de impacto mais conhecidos estão ReCiPe, BEES, Eco-indicator 99, CML 2001, IPCC2007 e pegada ecológica. As categorias de impacto podem ser divididas em categorias no ponto médio orientadas ao problema e categorias no ponto final orientadas aos danos. Categorias no ponto médio são: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, acidificação,

nutrição, toxicidade humana, ecotoxicidade (ISO 14047, 2003); e categorias no ponto final são danos à saúde humana, à qualidade dos ecossistemas e aos recursos. Conforme Baek et al. (2013) e Dahlstrøm et al. (2012) avaliações no ponto final apresentam mais incertezas do que no ponto médio.

Conforme Anastaselos et al. (2009), várias ferramentas têm sido desenvolvidas para ajudar na implementação da metodologia da ACV em materiais, elementos e sistemas e no edifício, podendo as ferramentas ser catalogadas em três níveis. O primeiro nível tem foco nos materiais para comparar diferentes produtos com base em critérios ambientais. Nesta categoria, há programas como o Gabi (Alemanha), o SimaPro (Holanda), o TEAM (França), o LCAiT (Suécia), entre outros. Algumas bases de dados conhecidas são empregadas nesses programas. O SimaPro, um dos programas mais conhecidos, usa as bases de dados *Ecoinvent v2*, *US Input Output*, *US-EI*, *Danish Input Output*, *Dutch Input Output*, *LCA food and industry data*, entre outros. Com elas é possível obter-se impactos em muitas categorias. Pesquisadores no Brasil como Munarim (2014) e Gomes e Silva (2015) têm usado a base da Ecoinvent ajustando os dados de materiais à matriz energética brasileira, para ser aplicada em pesquisas nacionais. O programa SimaPro permite esse ajuste, e os pesquisadores justificam o seu uso pela falta de dados no Brasil. Outra base de dados que tem sido muito usada mundialmente é a do *Inventory of Carbon and Energy* (ICE) da Universidade de Bath (HAMMOND; JONES, 2011). A base de acesso gratuito relaciona energia incorporada, emissões de CO₂ e CO₂ equivalente para diversos materiais da construção civil inglesa com base em médias nacionais.

O segundo nível consiste em ferramentas de suporte de decisão para o edifício. Entre as ferramentas disponíveis encontram-se a *Green Guide to Specification* do Reino Unido, que classifica os materiais por meio de ecopoints com base em ACV; a *Athena Impact Estimator* dos Estados Unidos e do Canadá (KÖNIG et al., 2010), a *Eco Quantum* da Austrália; a EQUER da França; e a OGIP da Suíça, entre outras. Algumas delas relacionam os impactos ambientais, por meio da ACV, com impactos econômicos, por meio da metodologia de CCV, tais como o a BEES dos Estados Unidos e a LEGEP da Alemanha. Ainda mais recentemente, foi desenvolvido o IMPACT (BRE; IES, 2015) em parceria entre o *Building Research Establishment* (BRE) e o *Integrated Environmental Solutions* (IES) como uma ferramenta para integrar uma avaliação ambiental e econômica à modelagem termoenergética do projeto no *software* IES (IES, 2015). Bayer et al. (2010) e Bribián, Usón

e Scarpellini (2009) apresentaram o estado da arte de ferramentas nessa área. Essas ferramentas geralmente já incorporam bases de dados de materiais e tecnologias do local, de forma a facilitar o cálculo da ACV, muitas delas concentrando a avaliação dos seus impactos em energia incorporada, emissões de CO₂ incorporado e CO₂ equivalente. Este último, em especial, está tomando cada vez mais força na Europa como indicador. E a terceira e última categoria de ferramentas para apoio na implementação da ACV consiste em metodologias de avaliação dos edifícios, como o BREEAM, LEED, entre outros, que incorporam alguns critérios de ACV.

Por outro lado, instituições como a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry* – SETAC) e o Programa Ambiental das Nações Unidas (*United Nations Environmental Programme* – UNEP) estão atuando com iniciativas para a promoção do uso da ACV nas edificações. As duas organizações uniram-se por meio da parceria “Iniciativa para o ciclo de vida” (*Life Cycle Initiative*), criada em 2002 para apoiar os usuários a fim de pôr em prática o pensamento do ciclo de vida mundialmente. O Brasil é parceiro na iniciativa da UNEP e SETAC e integra o Conselho Internacional do Ciclo de Vida, sendo em 2004 fundada a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV). No Brasil, a Resolução nº 4, de 15 de dezembro de 2010, aprovou, por meio do Inmetro, o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) com o objetivo de apoiar o desenvolvimento sustentável na produção industrial do país. Entre as ações propostas está definir categorias de impacto e métodos de AICV que sejam relevantes para o país. Contudo, o PBACV salienta também a necessidade de se pensar-se não só a questão ambiental, mas econômica e social (BRASIL; MDIC, 2010).

Para autores como Peuportier, Thiers e Guiavarch (2013) e Basbagill et al. (2013), a ACV fornece uma contribuição útil ao quantificar impactos ambientais e comparar alternativas morfológicas ou técnicas, de forma a ajudar na tomada de decisão, podendo ser usada nas fases iniciais de projetos. Peuportier, Thiers e Guiavarch (2013) aplicaram ACV a edificações energeticamente eficientes, mostrando os benefícios ambientais e a influência do comportamento do usuário no desempenho ambiental dessas edificações. Foram realizadas avaliações comparativas do desempenho energético de uma casa *passive house* com uma casa de referência que cumprisse a norma de desempenho térmico francês, usando avaliação do ciclo de vida e simulação termoenergética. Os resultados mostraram a forte influência dos usuários no desempenho

ambiental das edificações, porém, não modificaram o *ranking* entre a casa convencional e a *passive house*, mas os autores consideram que são necessários estudos mais aprofundados. Especificamente sobre o comportamento do usuário, a pesquisa em edificações residenciais brasileiras de Sorgato (2015) concluiu que os parâmetros termofísicos da envoltória são mais influentes no consumo de energia de condicionamento artificial para edificações unifamiliares do que o comportamento do usuário. Enquanto, em edificações multifamiliares, mostrou-se o oposto. Porém, igualmente conforme o autor, para edificações que apresentam envoltórias de alto desempenho, com transmitância térmica baixa e capacidade térmica média, o controle da ventilação natural e dispositivos de sombreamento por parte do usuário são muito importantes para proporcionar baixo consumo. Uma operação inadequada por parte do usuário pode proporcionar aumento nos indicadores de desempenho para esse tipo de edificações.

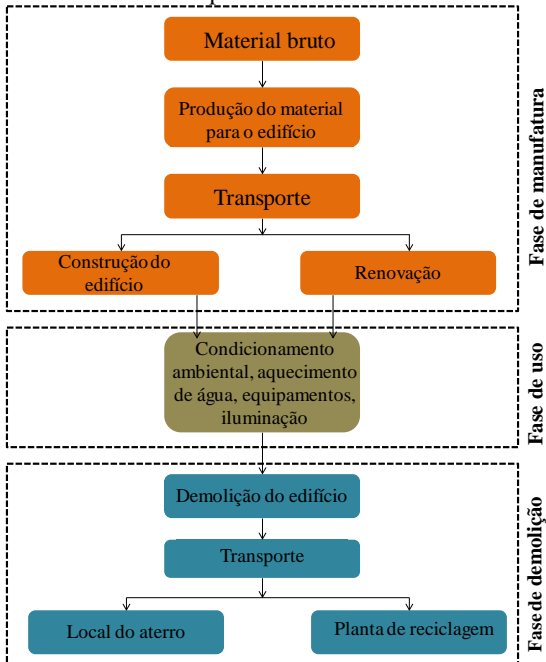
A ACV é muito útil para análise do ciclo de vida de edificações onde querem ser vistos impactos de forma mais ampla (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010). Entretanto, uma das questões com o uso de ACV em relação às edificações é que são necessários muitos dados sobre materiais para inclusão dos principais impactos, tornando complexo fazer uma análise completa de ACV para um edifício. Conforme Williams et al. (2012) há vários estudos completos de ACV na construção que seguem a normativa da ISO 14000 considerando vários impactos ambientais. Contudo, muitos desses estudos como Monahan e Powell (2012) têm considerado a simplificação de impactos no ciclo de vida tendo como foco exclusivamente a demanda de energia primária ou as emissões de CO₂ como indicador principal do potencial dano ambiental. Para Ramesh, Prakash e Shukla (2010) a quantificação da energia no ciclo de vida dos edifícios em termos de energia primária pode dar uma indicação útil das emissões de gases de efeito estufa provenientes dos edifícios e o seu impacto no meio ambiente. Na mesma linha, Paulsen e Sposto (2013) defendem a possibilidade de uso de estudos simplificados que considerem somente o uso da energia como indicador de impacto ambiental, dado a ser a produção de energia que gera a maioria das emissões e o uso dos recursos não renováveis. Assim, observa-se que a avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) (*Life Cycle Energy Analysis – LCEA*), que toma como base a metodologia da ACV, é bastante usada no setor das edificações (PAULSEN; SPOSTO, 2013; SARTORI; HESTNES, 2007).

3.1.2 Avaliação do ciclo de vida energético de edificações

Conforme Tavares (2006), a ACVE dá condições à avaliação de impactos importantes, como a emissão de gases de efeito estufa, com menos custo e tempo do que uma ACV. Igualmente, para Ramesh, Prakash e Shukla (2010), a avaliação do ciclo de vida energético de edifícios é desejável para formular estratégias de redução no consumo de energia primária e controle das emissões, por permitir identificar as fases que têm maior demanda e levantar diretrizes.

Na abordagem da análise do ciclo de vida energético, contam-se todas as contribuições relacionadas ao uso da energia de um edifício no seu ciclo de vida, incluindo a fase de manufatura, uso e demolição (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010) (Figura 7).

Figura 7 – Fronteiras do sistema para análise do ciclo de vida energético.



Fonte: Com base em: Ramesh et al. (2010).

Segundo a UNEP (2010b), essas fases podem ser consideradas como pré-uso, uso (que inclui tanto a energia para operação quanto para renovação/manutenção) e pós-uso (ou energia para desconstrução).

Conforme Bastos, Batterman e Freire (2013), estudos de análise de ciclo do vida com foco na energia têm usado, em geral, três unidades funcionais. Alguns fornecem a demanda energética total no período de vida útil da edificação, outros fornecem dados em relação à área usável em base anual (m^2 por ano) ou em um período de 50 anos, outros ainda usam área total e número de ocupantes. No caso de Gustavsson e Joelsson (2010), os autores colocaram como unidade funcional $1m^2$ de área (área útil sem paredes) para produção e operação do edifício em 50 anos.

Para Karimpour et al. (2014), embora tecnologias passivas tenham sido estudadas por diversos autores, há uma necessidade de estudar mais a fundo a importância da energia incorporada com o uso de tecnologias para a redução da energia operacional. Dessa forma, é necessária uma abordagem mais holística para que no futuro haja edifícios com redução no ciclo de vida energético.

Adalberth (1997) é uma referência importante na área por apresentar um método para calcular a energia usada no ciclo de vida da edificação. O autor denominou as fases do edifício de produção, gerenciamento e destruição. A produção corresponde à fase de pré-uso e inclui a manufatura dos produtos, o transporte e a construção da edificação. O gerenciamento corresponde à fase de uso e inclui a ocupação e a reforma. E a fase de demolição corresponde à fase pós-uso e inclui a demolição e a remoção dos materiais.

No ciclo de vida energético, energia incorporada é a energia usada na fase da constituição física do edifício. Inclui a energia contida em todos os materiais usados, inicialmente, na edificação (energia usada para aquisição das matérias-primas, que abrange escavação, manufatura e transporte até o local da obra), incluindo as instalações, a energia gasta durante o processo de construção, assim como a energia necessária para manutenção e reabilitação do edifício. Divide-se em energia incorporada inicial e recorrente. A energia incorporada inicial considera a energia contida nos materiais iniciais e a energia gasta no processo de construção da edificação (o que inclui geração de resíduos) e corresponde à fase de pré-uso. Por outro lado, a energia incorporada para aquisição, manufatura e transporte dos materiais usados na manutenção e na substituição dos materiais que tenham uma vida útil menor que a da edificação é conhecida como energia incorporada recorrente. Para essa etapa, é necessário conhecer a vida útil dos materiais e suas necessidades de manutenção. Assim, a energia incorporada total em uma edificação é a soma da energia incorporada inicial e da recorrente (RAMESH et al., 2010).

Conforme diversos autores, a energia incorporada nas edificações convencionais de países de climas frios varia de 10 a 20% do total da energia usada na vida útil da edificação (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010). Porém, para autores como Karimpour et al. (2014), em regiões com climas mais amenos, a energia incorporada pode representar uma parcela maior, ficando em até 25%. E, ainda, se for considerado o valor do carbono no tempo em relação aos alvos de emissão, o impacto da energia incorporada nas emissões futuras pode representar até 35% nas regiões com clima mais ameno. Igualmente, em edifícios com baixo consumo de energia que incorporam mais tecnologias, a energia incorporada é mais importante (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010; SARTORI; HESTNES, 2007).

A energia incorporada depende da escolha dos materiais, das fontes de energia primária e da eficiência do processo de conversão para a fabricação dos materiais e dos produtos usados no edifício (RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010). Autores como Rossi, Marique e Reiter (2012) indicam formas de redução da energia incorporada em habitações por meio do uso de materiais com baixa energia incorporada, de projeto de estruturas mais leves e eficientes que reduzam o consumo de materiais, do uso de materiais reciclados ou reutilizados, de reformas futuras no lugar de demolição e do uso de materiais locais.

Na fase de pré-uso inclui-se também o desperdício dos materiais. Dados de desperdício de materiais para o Brasil foram compilados com base na Pesquisa Finep "Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras" por Agopyan (1998) e Agopyan et al. (2003). Os autores desenvolveram uma metodologia para a medição das perdas de materiais e serviços, a qual foi aplicada a 100 canteiros de obra, trabalho realizado por meio de uma rede nacional de pesquisa. O trabalho confirmou a grande variabilidade nas perdas no país, tendo os resultados descritos considerado exclusivamente as perdas na fase de execução do empreendimento.

A fase de uso refere-se às atividades da operação do edifício, normalmente incluindo etapas como manutenção (energia incorporada recorrente) e energia operacional. A energia operacional é a energia gasta durante a fase de uso do edifício e inclui o uso de eletrodomésticos, aquecimento de água, iluminação, aquecimento e resfriamento dos ambientes e de cocção. Entretanto, segundo Karimpour et al. (2014), a energia usada para o condicionamento ambiental é a mais fortemente afetada pelo desenho do edifício.

A energia operacional representa a maior parcela de edifícios convencionais em países com climas mais extremos, podendo variar em países de clima mais temperados (RAMESH et al., 2010). O consumo energético na edificação pode ser realizado a partir de fontes primárias e secundárias. Algumas pesquisas mostram a energia operacional como energia primária e outras como de uso final. Todavia, é mais comum o uso de energia primária em análises de ciclo de vida, sendo assumida na maioria dos estudos como constante ao longo da vida útil do edifício, desconsiderando a influência de fatores como mudanças climáticas ou o comportamento do usuário, o que não se considera como o mais adequado. Para a conversão de valores de energia de uso final para energia primária, é necessário o uso de fatores de conversão, os quais variam de país para país (SARTORI; HESTNES, 2007). Para o Brasil, Paulsen e Sposto (2013) usaram um fator de conversão de energia final (eletricidade) em energia primária de 1,6 com base no inventário de 2003. No ano de 2012 o fator de conversão foi de 1,58 (BRASIL, 2013a), maior do que a previsão do PNE 2030, que estima esse fator em 1,49 para 2030.

Santos (2011) elaborou uma metodologia para o cálculo do fator de conversão da energia final em primária da eletricidade no Brasil. Considerando os anos 1970 a 2009 e os dados fornecidos pelo Balanço Energético Nacional esse fator teve uma variação de valores entre 1,25 e 1,51. Para a sua pesquisa, considerou um fator médio de 1,44 entre os anos de 2005 e 2009. No seu estudo também calculou cenários de conversão tanto para o fator de eletricidade em energia primária, quanto para as emissões de CO₂eq com base nos dados do PNE 2030. Para isso, criou alguns cenários, primeiro considerando a redução do uso de aquecimento elétrico para água, substituindo-o por gás; e em segunda instância com base na redução da participação da fonte hidráulica na matriz energética em 10%, 15% e 20% para 2030. Os valores correspondentes aos cenários da redução da contribuição hídrica na matriz energética variam de 1,49, adotado como cenário de referência previsto pelo PNE, até 1,62, 1,68 e 1,75, com as reduções colocadas anteriormente. Para as emissões de CO₂eq, os valores variam de 0,156 tCO₂/MWh no cenário de referência do PNE a 0,253, 0,302 e 0,351 respectivamente. Ressalta-se que o autor refere-se a valores de CO₂eq entretanto, a unidade fornecida nos valores é de tCO₂/MWh.

Na fase operacional, alguns estudos incluem o condicionamento ambiental, a energia para aquecimento de água, eletrodomésticos e a iluminação (DODOO; GUSTAVSSON; SATHRE, 2011; GUSTAVSSON; JOELSSON; SATHRE, 2010; RAMESH; PRAKASH;

SHUKLA, 2012; STEPHAN; CRAWFORD; DE MYTTENAERE, 2012), enquanto outros, conforme Sartori e Hestnes (2007), consideram apenas o condicionamento ambiental. Com relação ao consumo de energia, observa-se que o indicador mais usado nos resultados é geralmente expresso em kWh/m²/ano. A energia operacional, por vezes, é avaliada conforme dados nacionais disponíveis. Entretanto, estudos como o de Peuportier, Thiers e Guiavarch (2013) e Iyer–Raniga e Wong (2012) associam a metodologia da ACV ao uso de simulação termoenergética na fase de uso, o que é visto como algo desejável.

É importante levantar de forma mais específica questões relacionadas à energia operacional no setor em estudo. Para isso, e com relação ao Brasil, salienta-se que o setor residencial tem como principais fontes energéticas, o uso da eletricidade, com 45,8%, o GLP, com 26,4% e a lenha, com 24,6% (BRASIL; EPE, 2015). A lenha é principalmente usada para cocção no setor rural; o GLP, para cocção e aquecimento de água; e o consumo de energia elétrica, para eletrodomésticos e equipamentos. O gás natural está mais presente nos últimos anos, tomando um pouco do espaço do GLP. Porém, ainda com uma percentagem muito baixa (1,3%). E, por último, o carvão vegetal, apresenta um uso parecido com a lenha. O consumo médio atual de energia elétrica do setor residencial é estimado em torno de 179 kWh/domicílio/mês (BRASIL; EPE, 2015). Esse consumo varia muito mundialmente. Os Estados Unidos consomem aproximadamente 974 kWh/mês, a Alemanha 292 kWh/mês, enquanto a Nigéria 48 kWh/mês, conforme dados do *World Energy Council* de 2010.

Dados sobre porcentagem dos usos finais de energia elétrica no setor residencial são divergentes e dependem da renda dos ocupantes, do número e do comportamento dos usuários, entre outros fatores. Características culturais também são importantes, assim como tendências como o trabalho em casa, que demanda um maior uso de equipamentos de computação, entre outros. A última pesquisa do SINPHA (BRASIL; ELETROBRÁS; PROCEL, 2007), considerada a mais importante nesse tema no país, mostrou como principais usos finais de energia elétrica do setor para o Brasil a refrigeração, em especial, o uso de geladeiras e freezer (27%); o aquecimento de água, em especial, o uso de chuveiro elétrico (24%); o uso de condicionamento de ar (20%); a iluminação artificial (14%); e outros equipamentos (15,5%). Os dados do PNE 2030 (BRASIL; MME; EPE 2007) colocaram o consumo de ar-condicionado como representando 3% no setor residencial, mantendo-se a mesma previsão para 2030, divergindo, em muito, das porcentagens apontadas

pelo SINPHA. Resultados de outras pesquisas nacionais na área são mostrados por Ghisi, Gosch e Lamberts (2007), que tomaram como base de dados uma pesquisa patrocinada pela Eletrobrás e pelo Procel entre 1997 e 1999, em 12 dos 26 estados brasileiros, contendo 70% da população. Foram usados dados de 17 concessionárias, com um total de 17.643 residências analisadas. Fedrigo et al. (2009) tomaram como base de dados também os coletados pelo SINPHA (2007), porém aplicando uma metodologia diferente. E Silva et al. (2013) realizaram medições em uma amostra de 60 habitações de interesse social na região de Florianópolis, SC. Os resultados dessas pesquisas são apresentados na Tabela 2, conforme médias nacionais ou por região.

Tabela 2 – Porcentagem (%) por uso final do total de consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro conforme diversos autores.

Região e autor	Geladeira e freezer	Chuveiro elétrico	Lâmpadas	Condicionamento do ar	Outros equipamentos
Brasil; Eletrobrás; Procel (2007)	27	24	14	20	15,5
PNE 2030 Brasil; MME; EPE (2007)				3	
Brasil Ghisi et al. (2007)* (com base em dados de 1997–1999)	38 – 49	14–20 (sul) 3–11 (nordeste)	8–15 (verão) 11–19 (inv.)	2–26 (verão sul) 6–27 (verão norte)	15 (verão) 22 (inv.)
				3 (inv. sul) 6–7 (inv. norte)	
Brasil Fedrigo et al. (2009)	31	37 (verão ZB1) 45 (inv. ZB1) 1 (verão ZB7) 6 (inv. ZB7)	5,5	9 (verão regiões frias) 5 (verão regiões quentes)	17
Florianópolis Silva et al. (2013)	30	36	5,2		10,2**

Nota: *Os resultados são baseados na pesquisa realizada entre 1997 e 1999 por Eletrobrás e Procel. **Porcentagem corresponde unicamente ao uso da televisão. Inv. = Inverno.

Fonte: Com base em Brasil; Eletrobrás; Procel (2007); Brasil (2007a); Ghisi; Gosch; Lamberts (2007); Fedrigo et al. (2009); Silva et al. (2013).

Observa-se que, conforme as pesquisas anteriores, há uma variação nos usos finais do setor residencial em que, nas pesquisas nacionais, o aquecimento de água por chuveiro elétrico varia de 1% até 45%, dependendo da região, e o consumo de ar-condicionado varia de 3% a 20% do total do consumo de energia elétrica do país. Entretanto, destaca-se que os dados disponíveis das pesquisas nacionais são de alguns anos atrás e, portanto, podem não considerar variações com relação a ampliação do poder de compra das pessoas com menores rendimentos experimentados em anos anteriores (IBGE, 2013), mudanças nas tecnologias e uso dos equipamentos, assim como as ondas de calor recentes e prolongadas, que se têm experimentado, aumentando o consumo de ar-condicionado.

Finalmente, a fase de pós-uso compreende a energia para desconstrução, o que normalmente inclui a demolição no local, o transporte dos resíduos a aterros e, eventualmente, a reciclagem de materiais com o transporte às plantas de reciclagem. Nessa etapa, é possível reduzir parte da energia incorporada alocando-a nos materiais reciclados que comporão novos sistemas (PAULSEN; SPOSTO, 2013). Embora, conforme indicado por Ramesh, Prakash e Shukla (2012), geralmente as poupanças obtidas com a reciclagem ou reuso dos materiais de demolição no edifício não são consideradas na ACVE, principalmente por não se ter acordo geral. Porém, assim como os autores, acredita-se que seria mais apropriado, se utilizada, que fosse considerada no ciclo de vida do edifício. Em estudos de caso apresentados por Sartori e Hestnes (2007), observa-se que em edificações que consideraram a fase do processo de construção e demolição do edifício e o transporte desses materiais, a somatória das necessidades energéticas dessas fases foi um valor desprezível ou de aproximadamente 1% do total do ciclo de vida. Por essa razão, às vezes, esses processos não são contabilizados ou são simplificados, mas não há consenso geral em relação a isso.

Para todas as fases, são necessários dados com relação ao consumo energético do transporte. Com relação a isso, Guimarães et al. (2013) colocaram, com base em referências nacionais e internacionais, valores mínimo, médio e máximo para transporte rodoviário, o mais usado no Brasil. Esses valores foram estimados em 0,001663, 0,002044 e 0,002426 MJ/kg.km respectivamente. O valor mínimo é compatível com o valor estimado por Tavares (2006) de 1,62 MJ/ton.km. Por outro lado, as emissões com relação ao transporte rodoviário mostram vários valores dependendo da fonte. Leal Júnior et al. (2015) usaram o fator de emissão de CO₂ de 0,11917 kg/t.km para o transporte rodoviário com o uso de

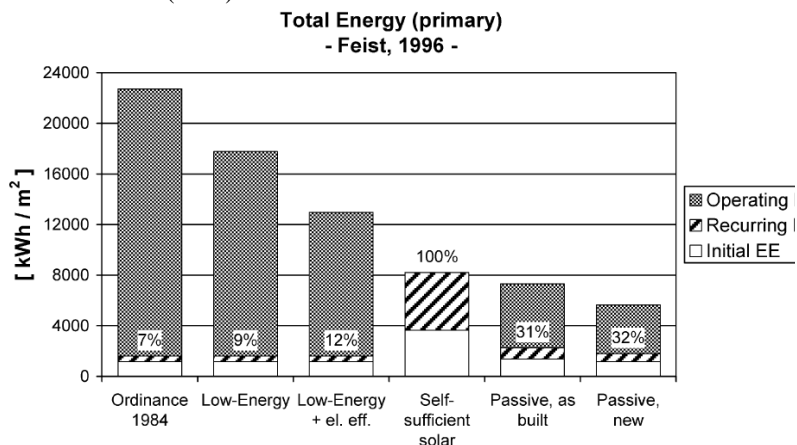
diesel no país, com base no relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas PBMC de 2013. Ferraz, John e Bessa (2010) colocaram fatores de emissão que variavam de 253,1 a 327,8 kgCO₂/1000 (t.km) dependendo do consumo de combustível com base em dados brasileiros e no WRI/GHG Protocol de 2010, considerando emissões mínimas e máximas. Para os autores, os valores de 0,0002595, 0,0002810 e 0,0003278 representavam a emissão máxima levando em consideração o transporte com consumo de 76, 82,3 e 96 litros/1000 t.km de consumo de diesel, respectivamente.

Diversas pesquisas têm como foco o estudo da ACVE nas edificações, buscando promover uma maior integração dessa metodologia no setor, sendo muitas delas para avaliação de alternativas de melhoria da eficiência energética das edificações. Pesquisas como as de Gustavsson, Joelsson e Sathre (2010) e Asdrubali, Baldassarri e Fthenakis (2013) consideraram todas as fases do ciclo de vida da edificação, mas se nota que poucos estudos abordam a fase de fim da vida útil com alternativas, como projeto para reuso ou desconstrução. Para isso, Tingley e Davison (2012) propuseram a ferramenta computacional chamada “Sakura” para avaliação de alternativas para essa fase do ciclo de vida. Por outro lado, estudos como o de Hernandez e Kenny (2010), Ramesh, Prakash e Shukla (2010), Iyer–Raniga e Wong (2012) e Bastos, Batterman e Freire (2013) analisaram o ciclo de vida energético de edificações, considerando, principalmente, as fases de energia incorporada e energia operacional, com boa parte deles focando apenas na emissão de CO₂ como impacto resultante. Por outro lado, pesquisas como a de Sartori e Hestnes (2007) e Ramesh, Prakash e Shukla (2010) têm mostrado que existe uma relação linear entre a energia operacional e a energia no ciclo de vida total da edificação, independentemente do clima e de outras diferenças do contexto. Ramesh, Prakash e Shukla (2010) fizeram a análise de 73 casos encontrados na literatura, entre os quais, 46 de edificações residenciais. O estudo mostrou um consumo maior na faixa de 150-400 kWh/m² por ano no total do ciclo de vida dos edifícios convencionais normalizados. Significa entre 27 GJ/m² e 72 GJ/m² para o total de 50 anos, levando-se em consideração a energia primária na qual a energia operacional responde por 80 a 90% do ciclo de vida. Os autores encontraram nos estudos analisados valores médios de energia incorporada de 5,8 GJ/m², que correspondem a 14% do total do ciclo de vida energético, energia operacional com 36,3 GJ/m², ou seja, 86% do total e energia total no ciclo de vida de 41,8 GJ/m² para 50 anos. No entanto, essa média corresponde a edificações em que algumas são consideradas convencionais; e outras,

de baixo consumo de energia. A maioria dos exemplos é de países com climas mais extremos. Entretanto, a amostra incluí alguns países como Índia, Indonésia e Tailândia, o que pode explicar os pontos com consumo operacional e no ciclo de vida muito baixos. Na análise de ciclo de vida foram consideradas unicamente as fases de energia incorporada e operacional, desconsiderando a energia usada para construção no local e a energia para demolição.

Sartori e Hestnes (2007) analisaram 60 casos encontrados na literatura. Para os autores, a demanda energética no ciclo de vida dos edifícios pode ser reduzida, por meio da operação com o uso de tecnologias ativas e passivas, embora signifique um pequeno aumento da energia incorporada. Contudo, o uso excessivo de tecnologias pode ser contra produtivo, pois edifícios de baixa energia podem ter melhor desempenho no ciclo de vida do que edifícios autossuficientes, pois nestes últimos, a parcela de energia incorporada, considerando-se a inicial e a recorrente, pode superar a da energia operacional no ciclo de vida total da edificação, conforme mostrado pelos autores na Figura 8.

Figura 8 – Ciclo de vida energético das seis versões do mesmo edifício no caso analisado de Feist (1996).



Nota: O edifício chamado “Ordinance 1984” é um edifício convencional, todos os demais são com estratégias para baixo consumo de energia. E o “self sufficient solar” é um edifício ZEB. As porcentagens representam a energia incorporada total (inicial e recorrente).

Fonte: Sartori e Hestnes (2007).

Com relação ao uso da energia, várias pesquisas apresentam avaliações comparativas de cenários com níveis de desempenho diferentes. Para isso, Famuyibo, Duffy e Strachan (2013) usaram protótipos representativos do estoque edificado para fazer a análise de ciclo de vida considerando melhoria do desempenho energético dos protótipos, para isso, empregaram três cenários que partiam do cenário-base ou prática atual até o *passive house*. Na mesma linha, outro estudo mais recente de Ramesh, Prakash e Shukla (2012) analisou dez tipos de habitações, considerando unifamiliar, duplex e multifamiliar. Foi levantado o consumo no ciclo de vida energético para as edificações convencionais e com a incorporação de quatro estratégias de eficiência energética, que consistiam em isolamento nas paredes e nas coberturas em diversos graus e uso de vidro duplo nas janelas. Os resultados para as duas cidades do país, com climas temperados, mostraram que o consumo no ciclo de vida dos edifícios convencionais variava de 240 a 380 kWh/m²/ano e, com o uso das estratégias, obtiveram-se reduções na ordem de 5% a 30%, alcançando para uma habitação que se propôs a ter zero consumo de energia com o uso de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas integradas na edificação, o consumo no ciclo de vida energético da edificação de 71,24 kWh/m²/ano.

O período estimado de vida útil para os edifícios foi notado nas pesquisas como de grande importância, pois quanto mais anos são considerados na vida útil da edificação, maior importância tem a fase de uso (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2012; (GUSTAVSSON; JOELSSON, 2010) para a qual muitos dos estudos indicam o horizonte de tempo a ser estudado de 50 anos (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2012). Entretanto, para alguns autores, outros fatores, além do tempo, podem influenciar nos resultados das diferentes fases. Para Berggren, Hall e Wall (2013), o procedimento usado na avaliação e condições de contorno, idade e origem da base de dados diferem em vários estudos e influenciam os resultados da energia incorporada. Por outro lado, Utama e Gheewala (2009) apontaram a seleção de materiais nas primeiras fases de projeto como tendo um papel fundamental na avaliação do ciclo de vida da edificação, não só pela sua energia incorporada, mas pelas propriedades térmicas que vão influenciar na operação da edificação.

A NBR 15575 estabelece no Brasil como vida útil o tempo compreendido entre o início da operação de um produto até o momento em que o produto não atende mais às exigências pré-estabelecidas pelo usuário. Ao mesmo tempo, essa norma determina o conceito de vida útil de projeto também chamado de VUP, como sendo definida pelo

incorporador/proprietário e por projetistas no início da produção do edifício, dando limites de desempenho mínimo e superior em anos para os sistemas. No contexto da norma, a VUP é praticamente “uma expressão de caráter econômico de uma exigência do usuário” (ABNT, 2013, p.42). Os projetistas, os construtores e os incorporadores são responsáveis pelo estabelecimento dos valores da VUP e pelo atendimento dessa vida com a especificação dos materiais no projeto. A VUP é considerada no lugar da vida útil, pois o atendimento à vida útil como tal pode ter influência de muitas condicionantes fora do controle (por exemplo, o clima). Por outro lado, o valor da VUP pode ser atingido com manutenções periódicas estimadas no manual do usuário na entrega das edificações. A norma estabelece a VUP para alguns dos seus componentes e fornece orientações para o cálculo dos valores da VUP para os componentes não especificados. E, embora reconheça que muitas referências internacionais estimam a vida útil da edificação entre 50 e 60 anos, a norma sugere o estabelecimento da vida útil em 50 anos, em especial para edificações de HIS.

No Brasil, verifica-se que ainda são poucos os estudos relacionados à análise do ciclo de vida energético de edificações e, ainda menos, aqueles que integrem avaliação de medidas de eficiência energética nos projetos. Entre os impactos, observam-se como o mais recorrente o consumo de energia e as emissões de CO₂. Algumas referências incluem o estudo de materiais específicos ou componentes da edificação, com poucas pesquisas que abordam o edifício de forma global. E, quando analisado o edifício, a maior parte dos estudos obtidos no setor residencial não apresentam a integração com o uso de simulação para a fase de operação.

No setor comercial, destaca-se a pesquisa de Munarim (2014), que desenvolveu um método com base no conceito de impacto ambiental evitado, para analisar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações. A sua proposta usa a ACV, e não somente ACVE. Como parte da sua metodologia, avalia estratégias de eficiência energética para a qual apresenta indicadores energéticos e ambientais. No seu estudo fez uso do programa *SimaPro* para a análise de ACV junto à simulação termoenergética com o programa *Energy Plus* para a fase de uso. Também nesse setor inclui-se o estudo de Bessa (2010), que avaliou, de forma integrada, tanto as emissões de CO₂ no ciclo de vida quanto o consumo de energia operacional por meio também da integração de análise do ciclo de vida com simulação computacional por meio do uso do programa

Energy Plus. O foco da pesquisa foi a avaliação comparativa de três sistemas de fachadas.

No setor residencial, Palacio (2013) fez um estudo para levantar a energia incorporada nos materiais que compõem o sistema de vedação de *light steel frame* considerando a fase de pré-uso. Foram avaliadas cinco composições diferentes de revestimento e dois tipos de isolante térmico. Os dados de energia incorporada foram obtidos de outros autores. De forma similar, Nabut Neto (2011) realizou uma pesquisa com relação à energia incorporada e a emissões de CO₂ para utilização de fachadas de *steel frame*, em Brasília. O sistema foi comparado, com outro de bloco cerâmico, argamassa e placa cerâmica. Foram levantados dados em relação à energia incorporada e a emissões de transporte realizado por caminhões. Os dados sobre emissões de CO₂ e energia incorporada dos materiais foram obtidos de fonte secundária, a maioria com base em dados nacionais.

Destaca-se nesse setor a pesquisa de Tavares (2006), que propôs uma metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras, considerando a energia incorporada e também a emissão de CO₂. A metodologia de Tavares (2006) propôs cinco modelos como representativos do setor residencial brasileiro, estabelecidos com uma abordagem *top-down* e para os quais avaliou o ciclo de vida energético. Os dois primeiros modelos eram representativos do setor de baixa renda, sendo o modelo 1 uma edificação unifamiliar e o modelo 2 multifamiliar. No entanto, conforme já apontado no Capítulo 1, as áreas consideradas nesses modelos não correspondem às áreas médias observadas das edificações dessas faixas de renda no PMCMV, em especial para o modelo 1. A energia operacional foi considerada a partir de dados do Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos (SINPHA), por meio de uma equação de regressão, sem o uso de simulação computacional. Para os cálculos dos consumos energéticos no transporte de materiais, foram usadas distâncias médias, e não levantadas as distâncias dos centros de transformação até o local da obra. Considera-se mais adequado o levantamento específico dado o peso que o transporte tem na energia incorporada. O autor calculou o transporte dos funcionários separadamente. Os resultados de todos os modelos mostraram que a energia incorporada alcança valores entre 29% e 49% no total do ciclo de vida; entretanto, o seu estudo avaliou casos convencionais sem a incorporação de medidas para o aumento da eficiência energética e a diminuição das emissões de CO₂. Igualmente, encontrou valores para o consumo energético no ciclo de vida de 50 anos

de 19,25 GJ/m², considerando-se a média dos cinco modelos. Por outro lado, a energia incorporada total ficou em 6,68 GJ/m², que corresponde a 34,5% de todo o ciclo de vida, enquanto a energia operacional, considerando eletricidade e cocção, ficou em 12,26 GJ/m² ou 63,35%. Foram também relevantes os pesos encontrados das diferentes fases. A energia pós-operacional, considerada para demolição e transporte dos resíduos de demolição apresenta uma relação com a energia incorporada inicial para os cinco modelos analisados em torno de 10%, conforme mostrado na Tabela 3. A energia pós-operacional representa em média para todos os modelos 2,17% de todo o ciclo de vida energético.

Tabela 3 – Relação entre energia incorporada inicial e pós-operacional em Tavares (2006).

Modelos	EI inicial (GJ/m ²)	E pós-operacional (GJ/m ²)	E pós-operacional /EI inicial (%)
1	4,63	0,49	10,58
2	4,10	0,40	9,75
3	4,90	0,41	8,36
4	4,56	0,43	9,42
5	4,12	0,34	8,25
Média de todos os modelos			9,27
Média do modelo 1 e 2			10,16

Nota: EI = Energia incorporada.

Fonte: Tavares (2006).

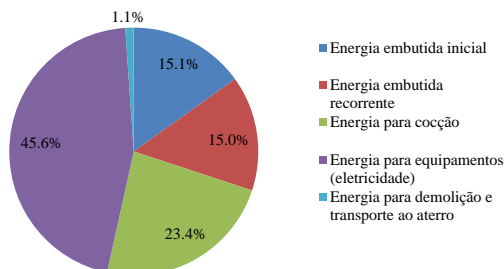
No estudo de Tavares (2006), o transporte dos funcionários teve pouca significância para os modelos de HIS. Os resultados para o modelo 1 mostraram que a energia consumida por equipamentos na obra representou 0,10%; a fase pré-operacional, 24%; a operacional, 72%; e a pós-operacional, 3% de todo o ciclo de vida. A energia incorporada inicial representou 25%; a energia incorporada recorrente, 13% e a operacional, só com equipamentos, 59%. Com relação aos materiais e considerando a energia incorporada, poucos materiais representaram a maior porcentagem, sendo a cerâmica vermelha a principal responsável, com 29%, mas, se considerada a energia incorporada total, a tinta passou a ocupar o 1^o lugar, devido ao número de reposições. Com relação à geração de CO₂, a energia incorporada total representou 56% do total de CO₂ gerado no ciclo de vida. No CO₂ total por materiais de construção, o cimento representou o 1^o lugar, seguido das tintas e da cerâmica vermelha. O autor relacionou a energia incorporada de alguns dos principais materiais de construção da tipologia residencial no Brasil com

o uso do método *input-output*. Outros dados usados pelo autor foram assumidos como valores médios de pesquisas nacionais e internacionais. Com relação ao CO₂ incorporado nos materiais, indicou uma forma para o levantamento das suas emissões com base em dados nacionais, considerando o consumo primário de energia por fonte, separando entre fontes de origem fóssil e renovável com base em dados médios. Esses dados podem ser empregados para aproximações iniciais de ACV. Entretanto, pesquisadores defendem que os dados devem ser mais locais, regionais e/ou dos fornecedores específicos, pois podem apresentar grandes diferenças de energia incorporada e emissões, conforme os processos de obtenção, observando-se uma grande variação entre fabricantes de um mesmo material.

Outra pesquisa brasileira para análise de ACVE foi realizada por Paulsen e Sposto (2013) em uma residência unifamiliar térrea, de 48 m², do PMCMV, localizada perto de Brasília. Os autores verificaram a energia incorporada e operacional durante o ciclo de vida da edificação, considerando três fases: pré-uso, uso e pós-uso. No seu estudo, usaram apenas dados dos principais componentes da edificação relevantes para o consumo energético: paredes, teto, piso, portas e janelas. Não foram considerados materiais para instalações por falta de dados e pouca quantidade e influência nessa tipologia. Os dados usados de energia incorporada nos materiais foram do berço ao portão, considerando extração dos materiais, transporte, processamento para fabricação do produto, com o portão sendo o produto pronto para uso na fábrica. Os dados foram de fonte secundária, a maioria dados brasileiros. Na falta de dados nacionais usaram dados de Portugal. Para a pesquisa, consideraram também uma porcentagem de desperdício com dados encontrados na TCPO de 1996 e em Agopyan et al. (1998). A TCPO é uma ferramenta de referência nacional para composição de serviços da construção civil publicada anualmente pela PINI, a qual inclui, por vezes, valores de desperdício. O tempo de manutenção dos materiais foi determinado pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e não foi contado para áreas pequenas como portas e janelas. A energia usada no processo de construção, por ser considerada principalmente com um trabalho realizado à mão sem o uso de grandes equipamentos, também não foi contabilizada. A unidade funcional para o estudo de caso foi definida como uma casa *standard* com 3,3 pessoas e área interna de 48 m² para durar 50 anos de vida útil. Para a energia operacional, foram coletados dados do SINPHA para o uso de equipamentos na casa; e, com regressão linear, os autores obtiveram uma equação para calcular a eletricidade usada por mês com base na renda, na

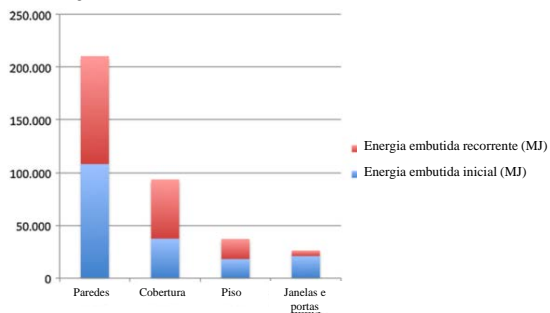
área da casa e no número de habitantes. A energia em uso foi convertida em energia primária. O uso de energia para cocção, tanto gás quanto lenha, foi estimado com base em dados do Balanço Energético Nacional. Para a fase de pós-uso, os autores assumiram que o prédio seria demolido, novamente com trabalho mais manual, sem uso de grandes equipamentos, e iria para um aterro próximo. Devido aos dados brasileiros serem escassos nessa área, foi tomado com base em tempo consumido e tipo de ferramentas presentes no TCPO (2010) e no cenário de Tavares (2006), que sugere quantidade de horas de trabalho da mão de obra e uso de energia para ferramentas e transporte interno. O estudo de Paulsen e Sposto (2013) não considerou a análise de desempenho termoenergético, por meio de simulação computacional, pois assume que esse tipo de habitações apresenta baixo uso de condicionado ambiental. Porém, não considera que o baixo desempenho térmico pode facilmente levar, em pouco tempo, ao uso futuro de aparelhos condicionadores de ar, além das mudanças previstas no clima futuro. Os resultados mostraram valores de 24,7 GJ/m² para 50 anos de vida útil, sendo 7,2 GJ/m² de energia incorporada, que correspondem a 30% do total de ciclo de vida, enquanto 17,5 GJ/m² é o total de energia consumida na operação (inclui eletricidade e gás para cocção), representando 70% (Figura 9a). Das partes do edifício, as paredes apresentaram a maior energia incorporada inicial e para manutenção (57%) (Figura 9b) baixa, se comparada com estudos internacionais. Porém, os autores fazem a ressalva de que grande parte dos estudos de ACV no Brasil refere-se à energia secundária, podendo fazer com que essa parte seja um pouco maior, se os dados fossem convertidos à energia primária.

Figura 9 – Resultados da pesquisa de Paulsen e Sposto (2013).



a) Energia no ciclo de vida total

Figura 9 (continuação)



b) Energia incorporada nas partes da edificação
 Fonte: Paulsen e Sposto (2013).

Os dados de pesquisas nacionais, quando relacionados com valores internacionais, mostram valores de energia incorporada relativamente alta e de operacional baixa. Contudo, os estudos nacionais aqui levantados são de edificações residenciais convencionais, sem incorporação de estratégias de eficiência energética, o que pode mudar esses valores. Igualmente, cabe ressaltar que os valores dos estudos internacionais não fazem menção à energia para cocção, diferentemente dos estudos brasileiros. A Tabela 4 mostra um resumo com dados internacionais e nacionais no ciclo de vida energético de edificações residenciais.

Tabela 4 – Resumo de dados de pesquisas com valores totais de ACVE.

Autores	País	Total para 50 anos					
		Energia incorporada		Energia Operacional		Energia total no ciclo de vida	
		GJ/m ²	%	GJ/m ²	%	GJ/m ²	%
Ramesh et al. (2010)	Dados internacionais	5,8	14	36,3	86	41,8	100
Tavares (2006)	Brasil	6,68	34,5	12,26	63,35	19,35	100
Paulsen e S. (2013)	Brasil	7,2	30	17,5	70	24,38	100

Fonte: Com base em dados de Ramesh, Prakash e Shukla (2010), Tavares (2006) e Paulsen e Sposto, (2013).

Por outro lado, outras pesquisas brasileiras levantaram dados de emissões de CO₂ de materiais de construção. Destaca-se Costa (2012), que propôs um método para quantificação das emissões de CO₂, geradas

pela produção de diversos materiais, que são usados na indústria da construção civil brasileira. O método apresenta uma fórmula geral que é adaptada aos materiais usados, considerando três níveis de precisão, divididos em básico, com base em dados médios; intermediário e, avançado, com base em dados específicos dos produtores. São consideradas as etapas de extração de matérias-primas, processamento e transporte. A aplicação do método foi dada em uma habitação unifamiliar de baixa renda no Rio de Janeiro, na qual a produção dos materiais representou cerca de 40% das emissões totais no ciclo de vida.

Mais dados de energia incorporada e emissões de CO₂ de materiais da construção brasileira podem ser também encontrados em outras pesquisas como a de Garcia (2014), Taborianski, Simoni e Prado (2008), Santos e Pereira (2008), Soares e Pereira (2004), Mastella (2002), entre outros, em que foram realizadas análises da produção local. Entretanto, esse é um tema ainda muito incipiente no país. Alguns dos dados encontrados apresentam fronteiras de análise diferentes entre eles, e outros não as deixam explícitas. Também se apresenta uma grande diferença do tempo entre as pesquisas. Outras pesquisas têm realizado análise do ciclo de vida de materiais e componentes; entretanto, não apresentam índices específicos de energia ou emissões de CO₂ incorporadas. A Tabela 5 mostra o levantamento realizado por Garcia (2014) com relação à faixa de valores encontrados para energia incorporada e emissões de CO₂ em pesquisas brasileiras. Por outro lado, o Apêndice A relaciona as pesquisas brasileiras levantadas com a origem dos dados que puderam ser obtidos, diferenciando se foram dados primários ou secundários, com base em outros autores.

Tabela 5 – Faixas de valores levantados em pesquisas nacionais para energia incorporada e emissões incorporadas dos materiais no Brasil.

Material	EI (MJ/kg)	CO₂ (kgCO₂/kg)
Aço	6,068–25,29	0,5–2,04
Cerâmica vermelha	0,56–3,746	0,61–1,911
Concreto–bloco	0,145–1,308	0,02–0,235
Areia	0,005–0,06	0,001–0,006
Argamassa mistura	0,232–3,47	0,037–0,347
Brita	0,015–0,08	0,001–0,005
Cal hidratada	0,83–4,82	0,659–0,939
Cimento Portland	1,15 2.9–3.3 3,86	0,18–0,821
Concreto simples	0,1–0,704	0,021–0,16
Gesso	1,017–6,88	0,074–0,771

Fonte: Garcia (2014).

Contudo, as bases de dados nacionais para materiais de construção ainda são muito escassas. Atualmente, o CBCS está realizando um estudo para levantamento de dados dos principais materiais da indústria da construção civil brasileira considerando diferentes fabricantes, por intermédio do projeto - ACV Modular -, o que se espera seja um avanço importante na área.

3.1.3 Conforto térmico do usuário

O conforto térmico do usuário foi abordado em pesquisas como a de Risholt, Time e Hestnes (2013) como um dos indicadores possíveis para aspectos ou critérios sociais do uso da energia nas edificações. Os autores tomaram como base o *British Institute for Sustainability* que publicou um guia para renovações sustentáveis de habitações onde fornece um método interativo para avaliação de soluções para renovação. O método divide indicadores nas categorias econômica, de desempenho, social e impactos do uso. Na categoria social encontram-se como indicadores: melhoria do conforto térmico, qualidade do ar e melhoria da estética. Considerando esse contexto, o conforto térmico do usuário é abordado nesta pesquisa como um possível indicador do aspecto social relacionado ao desempenho termoenergético dos edifícios, por considerar a operação da edificação com o uso de ventilação natural. Considerando que o conforto térmico do usuário pode estar relacionado tanto ao desempenho térmico da edificação quanto ao comportamento do usuário.

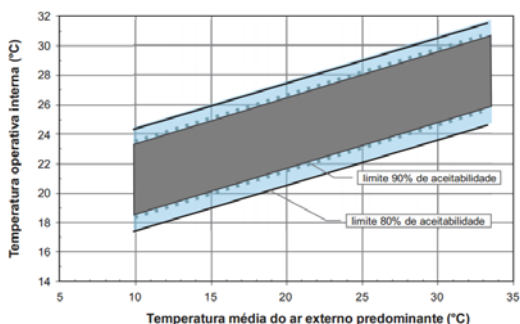
Existem várias normas desenvolvidas para conforto térmico que avaliam condições de conforto para ambientes moderados e extremos. Entre as normas para ambientes moderados, encontram-se a ISO 7730 (ISO, 2005) e a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013).

A ISO 7730 usa a metodologia do Voto Médio Preditado (*Predicted Mean Vote – PMV*) e da Porcentagem de Insatisfeitos (*Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD*) para avaliação de conforto térmico de ambientes considerados em condições de estado estacionário. Foi elaborada especialmente para ambientes de trabalho, podendo ser aplicada a outros ambientes, e foi pensada especialmente para ambientes condicionados; entretanto, dá recomendações para considerar a adaptação das pessoas para avaliação e projeto dos edifícios. O anexo B da ISO 7730 indica as taxas de metabolismo para diferentes atividades; e o anexo C, a estimativa de isolamento térmico das roupas. Por outro lado, a ASHRAE 55, norma da *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, é uma das mais atualizadas hoje em dia. Mostra

formas de avaliações das condições de conforto para espaços condicionados e para espaços com uso de ventilação natural. Este último com base no modelo do método adaptativo de De Dear e Brager (1998), no qual as temperaturas internas operativas aceitáveis estão dadas em relação à média das temperaturas externas (LAMBERTS et al., 2013). Nela, ambientes naturalmente ventilados devem ser avaliados por meio de faixas para condições de conforto para 80% e 90% de aceitabilidade. Para isso, devem ser considerados não menos do que os sete últimos dias ou no máximo 30 dias, por meio da média aritmética da temperatura externa. São considerados pesos diferentes para cada dia. Segundo esse método, se a temperatura operativa é maior do que 25°C, permite-se um aumento nos seus limites de 1,2°C, com velocidade média do ar de 0,6 m/s. Igualmente, o limite pode aumentar para 1,8°C, com velocidade média do ar em torno de 0,9 m/s e, para 2,2°C, com velocidade média do ar em torno de 1,2 m/s (ASHRAE, 2013). A norma também estabelece que espaços com ventilação híbrida devam ser avaliados, conforme o método dos ambientes com ventilação natural.

Recentemente, foi proposta uma atualização para a norma brasileira para conforto por Lamberts et al. (2013), com base na ASHRAE 55. Para que seja possível a avaliação de conforto para ambientes naturalmente ventilados, devem ser seguidos alguns requisitos, tais como: o não uso nas horas ocupadas de sistema de condicionamento artificial de forma integral; as taxas metabólicas estarem entre 1,0 e 1,3 met; o isolamento dos ocupantes sala de estar entre 0,5 e 1,0 clo e a temperatura média externa predominante ser entre 10 °C e 33,5 °C. Para avaliação de conforto, é considerada a temperatura interna dentro dos limites da faixa de aceitabilidade de 80%, conforme exhibe a Figura 10.

Figura 10 – Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados com os limites de 80% (normativos) e de 90% (informativos).



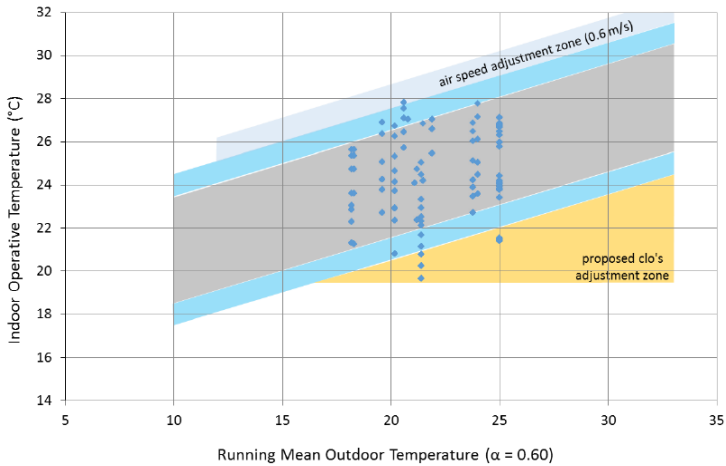
Fonte: Lamberts et al. (2013).

O item 8 da proposta estabelece condições de atendimento à norma na etapa de projeto:

“Para edifícios sem condicionamento artificial deve-se considerar os limites [...] apresentando o número de horas excedidas e a média ponderada do grau de severidade das horas excedidas [...]” (LAMBERTS et al., 2013).

De Vecchi et al. (2014) avaliaram o método adaptativo proposto na ASHRAE de 2013 para duas zonas bioclimáticas brasileiras: ZB3 e ZB8 em edifícios comerciais. No cálculo da média da temperatura externa predominante ($T_{pma(out)}$) não foram observadas mudanças significativas nos valores usando os sete últimos dias ou média mensal de temperatura externa. Também foi proposta uma zona com adaptação no clo, em que pudesse ser ampliado o limite inferior de aceitabilidade considerando 19,5°C (Figura 11).

Figura 11 – Dados de aceitabilidade térmica do experimento de De Vecchi (2011) plotados na zona de aceitabilidade de temperatura operativa para espaços naturalmente ventilados com zona para ajuste do clo.



Fonte: De Vecchi et al. (2014).

As normas de conforto térmico citadas têm como objetivo a aplicação em edificações não-residenciais. Entretanto, Peeters et al. (2009) propõem faixas aceitáveis de temperatura e escalas de conforto em residências para serem usadas em simulações. Para tal, são definidos limites diferentes para os ambientes considerando dormitórios, banheiro e outros ambientes. As zonas de conforto tomam como referência o estudo de 39 casas belgas. Van Hooff et al. (2014) usaram os mesmos parâmetros dos autores anteriores para o seu estudo de avaliação de medidas de adaptação a mudanças climáticas em edifícios residenciais na Holanda. Por outro lado, Becker e Paciuk (2009) realizaram um estudo com 205 habitações no verão e 189 no inverno para analisar o conforto térmico considerando ambientes condicionados e não condicionados em Israel. O estudo identificou 90% de satisfação nos limites de 19,5°C e 26°C para condições de condicionamento passivo no inverno e verão, respectivamente. Para os períodos com condicionamento artificial, um *setpoint* na temperatura de 21,5°C para inverno e 23°C para verão foi usado. Igualmente, Taleghani et al. (2013) usaram o método de conforto adaptativo para avaliação do uso da energia e conforto térmico dos usuários em diversas configurações em uma quadra de edificações residenciais na Holanda. A avaliação foi realizada usando simulação computacional com o programa *Design Builder*. O principal objetivo era

avaliar o efeito da geometria da edificação na sua demanda anual para aquecimento, o fator de luz dia, a demanda energética anual para iluminação, perdas por calor, ganhos por meio das janelas externas e horas de desconforto. Foi considerada a ventilação natural para verão, com base na norma europeia de conforto térmico EN15251 de 2007. As horas de desconforto foram calculadas com relação aos limites de temperatura operativa da norma. As porcentagens das horas de desconforto foram calculadas dividindo o número total de horas de desconforto com relação ao número total de horas em que as zonas são ocupadas. Contudo, deve ser considerado que os estudos descritos foram realizados em países com clima frio.

Por outro lado, a pesquisa de Griego, Krarti e Hernández–Guerrero (2012) considerou uma análise para a melhoria da eficiência energética em edifícios residenciais, relacionando a melhoria do conforto térmico dos usuários com poupanças financeiras e de energia usando o PMV. O objetivo era mostrar soluções ótimas que de forma passiva, atingissem parâmetros aceitáveis de conforto térmico na casa sem condicionamento de ar. Foram usadas simulações termoenergéticas e procedimentos de otimização para avaliar várias combinações de medidas de eficiência energética, de forma a estimar um grupo de recomendações ótimas para uma casa típica em Salamanca, México. A análise de conforto foi realizada com base no modelo de Fanger para estimar o voto médio predito para cada hora do ano e usada como verificação para a otimização dos resultados. Os custos energéticos anuais foram calculados usando a análise do custo do ciclo de vida, considerando o custo de capital associado com cada medida (ou combinação de medidas), o preço da unidade de gás e eletricidade, o período de financiamento da casa, a taxa de financiamento, a taxa de inflação e a taxa de desconto normal. A vida útil do edifício foi estimada em 30 anos. Como parte da metodologia, foi simulada a mesma casa com ventilação natural e com uso de condicionamento de ar. O programa usado foi o *Building Energy Optimization with EnergyPlus* (BEOptE+) do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Foram avaliadas cerca de 18.000 combinações de medidas para cada modelo que incluíam o uso de equipamentos e envoltória mais eficiente. Os resultados dos estudos sugeriram que uma combinação de melhoria na eficiência de equipamentos, aumento nos níveis de isolamento térmico de paredes e coberturas e melhoria na eficiência de sistemas de aquecimento de água são necessários para alcançar soluções com baixos custos, que podem resultar em economias na ordem de 52% em novas habitações. Os

melhores resultados foram obtidos tomando como base a máxima percentagem de poupança energética anual e os mínimos custos anuais relacionados à energia. Destacaram o uso de isolamento como potencial para alcançar a melhoria no conforto térmico e evitar o uso de condicionamento artificial. Também se mostrou como algumas recomendações dadas pela norma de energia do país causavam desconforto e aumentavam o consumo de energia. Além das estratégias recomendadas para o clima temperado analisado, o estudo destacou a importância de análises mais holísticas para o desempenho dos edifícios. Porém, o trabalho dos autores não relacionou os impactos da obtenção das estratégias propostas com energia incorporada ou emissões de CO₂, o que talvez poderia levar a indicar outras diretrizes.

Enquanto vários dos estudos acima citados usaram horas de desconforto como indicador de desempenho para conforto, outras pesquisas como as de Panão (2014), Almeida et al. (2013), Curcio e Silva (2013), Batista (2011), Sozer (2010), Sorgato (2009) e Versage (2009) entre outras, usaram graus-hora como indicador de desempenho térmico para edificações naturalmente ventiladas. Igualmente, o RTQ-R para a etiquetagem de energia em edificações no Brasil, considera esse mesmo indicador para o desempenho da edificação no verão. Nas pesquisas acima graus-hora é definido como o somatório da diferença de uma temperatura horária quando se encontra acima de uma temperatura-base para graus-hora de resfriamento, ou, abaixo da temperatura base quando considerado graus-hora para aquecimento. É um método adequado para a análise do desempenho térmico de edificações residenciais naturalmente ventiladas, visto que relaciona a temperatura operativa em ambientes sem condicionamento artificial. Ao mesmo tempo pode ser considerado relacionado ao conforto do usuário, pois mostra, além das horas de desconforto, quantos graus por hora têm-se acima do limite estimado, o que se acredita ser um parâmetro que pode mostrar facilmente aos usuários os resultados de avaliações.

3.1.4 Custo no ciclo de vida das edificações

“Como o termo usualmente indica, as intervenções de habitações de interesse social buscam custos iniciais baixos por unidade entregue, com mínima consideração pelo custo no ciclo de vida da casa dada aos usuários, à comunidade e sociedade em geral” (CIB; UNEP, 2002, p.30, tradução nossa).

Segundo Carlo (2008), a avaliação econômica permite mostrar se os investimentos em eficiência energética de uma edificação trazem benefícios econômicos reais, imediatos ou em longo prazo. A autora analisou métodos que são usados para essas avaliações, quais sejam: análise de retorno de investimento, avaliação do custo do ciclo de vida (CCV), custo-benefício e custo da energia conservada (CEC). Os cálculos realizados por custo do ciclo de vida e custo de energia conservada (quando considerada a variável tempo) mostraram-se os mais adequados, por integrarem a variável da vida útil no cálculo com as suas variações de custos. De igual forma, para Fuller e Petersen (1995), comparações de alternativas de projetos de conservação de energia em edifícios são excelentes para a aplicação do método de CCV, sendo buscada a opção com o menor custo.

A pesquisa de Gluch e Baumann (2004) abordou o uso de análise de custo no ciclo de vida como uma ferramenta para tomada de decisão ambiental. Eles identificaram áreas de pesquisa necessárias, entre as quais se encontram o desenvolvimento maior de ferramentas que integrem considerações ambientais e micro-econômicas, assim como o alongamento das fronteiras de metodologias como o CCV com ferramentas que focam em medidas físicas como a ACV, enfoque já apontado por outros pesquisadores.

A CCV é um método econômico de avaliação de projetos que leva em consideração todos os custos das fases do ciclo de vida da edificação, como construção, operação, manutenção e final da vida, sendo especialmente indicado para avaliação de alternativas de projeto de edifícios com diferentes opções (BSI, 2008; DEPARTMENT OF ENERGY; FULLER, 2005; SCHADE, 2003). Pode ser aplicado, entre outros, para tomada de decisão com comparação de possíveis projetos de edifícios, determinação de poupanças em energia ou água com *retrofit* de edificações, determinação de formas mais econômicas de alcançar alvos de energia ou determinação de tamanhos adequados de sistemas de edificações (DEPARTMENT OF ENERGY; FULLER, 2005). A CCV é, por vezes, confundida com *Whole Life Costing* (WLC); entretanto, a diferença entre os dois é de que o WLC pode considerar também custos de externalidades e outros custos que não estão associados à construção (BSI, 2008).

A ISO 15686-5 é uma norma internacional para a metodologia de custos no ciclo de vida em edificações, que mostra os princípios da metodologia e da definição de termos, fazendo parte da série ISO 15686 “*Buildings and constructed assets - Service life planning*” (KÖNIG et al.,

2010). Há algumas normas, iniciativas e programas disponíveis para introdução do conceito de CCV nas primeiras etapas de projeto das edificações. As normas da ASTM em economia para edifícios e, em especial, a E917, atualizada em 2013, “*Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems*”, contêm documentos para avaliar o desempenho econômico dos investimentos nos edifícios. Por outro lado, o Departamento de Energia dos Estados Unidos criou um programa de distribuição gratuita, o *Building Life-Cycle Cost Program* (BLCC), que realiza análises econômicas, utilizando a avaliação dos custos relativos efetivos de alternativas de edifícios, especialmente medidas de conservação de energia e projetos de energias renováveis. O programa também estima emissões no ciclo de vida de gases de efeito estufa relacionados ao uso de energia dos edifícios (DOE, 2013).

No CCV são importantes, entre outros, termos como custos iniciais ou capitais, que podem ser os mesmos; custo descontado, que resulta do custo real considerando uma taxa de desconto real, ou do custo nominal descontado por uma taxa de desconto nominal. O custo nominal é o preço esperado a ser pago e pode incluir mudanças como inflação, entre outras. O custo real é o valor na data-base, o qual exclui inflação. Igualmente, a taxa de desconto, que reflete o valor do dinheiro no tempo, pode ser usada tanto para converter valores futuros ao tempo presente quanto para o contrário. E valor residual é o valor de um componente ou sistema no final do período de análise (BSI, 2008). Um dos métodos mais conhecidos para aplicação do CCV é o de Valor Presente Líquido (VPL) ou *Net Present Value* (NPV) e mostra-se, segundo Schade (2003), como o mais apropriado para a indústria da construção, ao aplicar fatores de desconto com base em uma taxa de retorno requerida para cada fluxo de caixa nos anos projetados, de forma que os fluxos de caixa sejam descontados a valor presente. Porém, o VPL não é aplicável para comparação de alternativas com diferente duração de vida (FULLER; PETERSEN, 1995). No VPL consideram-se custos como valor inicial no ano 0, custos no final da vida, custos de manutenção e valor residual como preços fechados, enquanto custos de energia operacional como custos recorrentes anuais.

Pesquisas como a de Ibn-Mohammed et al. (2014), Morrissey e Horne (2011) e Kneifel (2010) incluíram a variável econômica junto à análise do ciclo de vida para avaliação de estratégias de eficiência energética em edificações. A justificativa foi considerar uma real redução dos impactos no ciclo de vida.

O estudo de Kneifel (2010) avaliou economias energéticas, emissão de CO₂ e custos efetivos das medidas de eficiência energética no ciclo de vida; entretanto, seu estudo foi sobre prédios comerciais. O autor usou uma abordagem de projeto integrado para estimar as implicações do custo das emissões de carbono, com base na energia, usando ACV com CCV e simulações de energia no *Energy Plus* para doze edificações típicas comerciais estabelecidas de acordo com dados nacionais, cada uma em dezesseis cidades americanas. As análises de CCV foram realizadas para quatro períodos diferentes, considerando 1, 10, 25 e 40 anos. O autor informa que períodos de tempo mais longos são melhores para considerar custos relevantes de operação; contudo, aumentam incertezas pelas suposições realizadas em relação aos custos e ao comportamento de usuários no futuro. Na pesquisa, o caso base foi comparado com três alternativas de projetos energeticamente eficientes. O método usado para CCV foi economia líquida, e taxa interna de retorno ajustada (ATIR). Foi usado o *software* BEES da NIST para verificar as diferentes alternativas em relação a custos e para a análise do ciclo de vida. Como resultado, obtiveram-se uso da energia, custo da energia, custo no ciclo de vida, emissões de carbono e custo do carbono das diferentes alternativas. Os resultados mostraram reduções efetivas na aplicação de estratégias convencionais de eficiência energética, como isolamento térmico, vidros de baixa emissão, sombreamento nas janelas e controles de iluminação natural, tanto no consumo de energia (20-30%), quanto nas emissões de CO₂ (16% na média). Para algumas cidades, essas estratégias foram efetivas no ciclo de vida, independentemente do período de estudo; entretanto, prazos maiores de estudos mostraram-se mais efetivos no custo. A redução da pegada de carbono também foi observada, em especial, em estados em que a matriz tem menor uso de energia renovável. Igualmente, foi verificado que a introdução do custo no carbono aumentou a taxa de retorno nos investimentos em todos os edifícios e cidades.

Similar ao estudo anterior, Morrissey e Horne (2011) usaram uma abordagem integrada de simulação termoenergética e CCV em uma amostra de residências na Austrália para investigar as implicações de CCV em um clima temperado. Para CCV, foi usado o método de valor presente líquido. O *software* usado para as simulações foi o *AccuRate* da certificação australiana *NatHERS* (*Nationwide House Energy Rating Scheme*), com o qual estimaram as necessidades de aquecimento e resfriamento (MJ/m²/ano). O *software* apresenta interação entre ventilação natural e condicionamento artificial, considerando o conforto

dos usuários. Partindo de um caso base, foram modelados quatro cenários com melhoria gradual de desempenho térmico, obtido, inicialmente, pela adição de materiais. No total foram analisadas 80 casas. As estratégias para a melhoria da eficiência energética incluíram novos materiais, considerando custos ascendentes, tais como: isolante no forro, controle de infiltração, sombreamento, isolante externo nas paredes, vidro com melhor desempenho e isolante interno nas paredes. Foi considerada uma vida útil de 40 anos. O estudo foi realizado para quatro horizontes de tempo: 5, 10, 25 e 40 anos. A taxa de desconto real diminuiu após 30 anos, com base em outros estudos e ainda foram comparados dois cenários de custo energético. O comportamento do usuário foi mantido padrão. Os resultados mostraram que, no horizonte de 40 anos, as casas com envoltórias com melhor desempenho térmico (8 estrelas no NatHERS⁸) apresentam um custo ótimo, tanto para o cenário com alto e baixo preço da energia; no entanto, não foi considerada a energia incorporada. As poupanças energéticas do cenário da casa de 8 estrelas foram três vezes maiores do que as da casa de 6 estrelas em um período de 40 anos, mas o custo inicial foi mais do que cinco vezes maior. A análise de sensibilidade aplicada mostrou que o custo no ciclo de vida pode variar muito em função do valor residual do mercado atribuído ao investimento de eficiência energética. Assim, o estudo sugeriu que investimentos em eficiência energética têm poupanças significativas ao considerar horizontes de 25 e 40 anos, em especial, quando se considera o aumento no preço da energia. Os resultados confirmaram que o projeto do edifício com melhor custo é sempre um projeto mais eficiente que o requerido pelo código de energia nacional, isto quando considerado um horizonte de tempo maior.

No Brasil, poucas pesquisas têm abordado questões econômicas para incorporação de várias estratégias simultâneas de eficiência energética nas habitações. Recentemente, Invidiata e Ghisi (2016a) propuseram a análise energética e econômica de quatro sistemas de janelas com sombreamento considerando o ciclo de vida. A análise foi realizada com simulação computacional na fase de uso para uma residência em Florianópolis. A energia incorporada nos materiais foi

⁸ O *rating* do *NatHERS* varia de 0 até 10 com base na demanda de aquecimento e resfriamento em MJ/m². A partir de cinco estrelas é considerada uma edificação com eficiência energética mínima de 182 MJ/m², representando um cenário base. Portanto, oito estrelas representa uma casa com alta eficiência energética, com 64 MJ/m².

obtida de pesquisas internacionais e nacionais. A análise econômica tomou como base a metodologia de custos no ciclo de vida.

A pesquisa de Bodach e Hamhaber (2010) relacionou maior eficiência energética nas habitações de interesse social com redução nas contas de energia, porém as análises de custos foram associadas somente ao custo capital. Os autores propuseram estratégias de melhoria de eficiência energética com benefícios e custos em um estudo de caso de uma edificação residencial multifamiliar de quatro andares, em uma comunidade de baixa renda no Rio de Janeiro. A tipologia foi considerada por eles como recorrente nesse setor no contexto urbano. Também foram realizadas entrevistas com especialistas do setor habitacional e da área de eficiência energética, as quais revelaram que os custos iniciais são uma das principais barreiras para obter maior eficiência energética nas edificações, pois não são considerados os custos no ciclo de vida, devido à falta de interesse do construtor na redução do preço da obra, em virtude da conta de energia futura ser do usuário final. As estratégias de eficiência energética do projeto foram estimadas por meio de uma matriz que considerava o local de implantação (redução de ilhas de calor, sombreamento das fachadas, aumento da ventilação), conforto térmico e visual (melhoria do desempenho térmico da envoltória, aumento da ventilação natural, garantia de iluminação natural e redução de ganhos solares diretos), equipamentos (uso de aquecimento solar, redução na demanda de equipamentos e de iluminação artificial) e critérios de eco-eficiência (redução ambiental por meio do uso da terra, redução no consumo de água, redução no impacto dos materiais e na necessidade de transporte). As áreas foram relacionadas com critérios desejáveis de serem alcançados e foi avaliada a situação atual do projeto em relação ao seu desempenho atual. Posteriormente, foram propostas estratégias com medidas de implementação para melhoria dos itens tidos como necessários. Entretanto, a metodologia não abordou métodos de simulação ou outros mais específicos que demonstrem, de forma efetiva, a melhoria alcançada no conforto do usuário ou considerem consumos ao longo do tempo. Como resultado, obteve-se um custo total inicial de R\$ 4.570,31 de aumento por unidade habitacional para a implantação das medidas propostas, mas os autores ressaltaram que, enquanto estratégias, como a instalação de um aquecedor solar, poderia aumentar o pagamento mensal do usuário em R\$14,47 na época do estudo, a poupança seria de R\$22,55 por mês. Assim, deveriam ser vistos os custos e os benefícios alcançados.

Com relação a custos de implantação de estratégias de eficiência energética em projetos de HIS, Triana e Lamberts (2013) fizeram também um estudo para a Companhia de Habitação de Santa Catarina, que propunha alterações com relação a estratégias de uso racional de energia e água para a casa padrão de 36 m² da Cohab SC. As estratégias para uso da energia foram propostas com relação à envoltória e ao uso de aquecimento solar por meio de uma torre anexa a casa que também incorporava soluções para captação de água da chuva. Com relação ao desempenho termoenergético da envoltória, foram avaliadas medidas em relação à melhoria dos graus-hora para resfriamento e aquecimento tomando como base os níveis estimados no RTQ-R. Foram propostas alterações para a envoltória com relação à melhoria na ventilação, no sombreamento e no isolamento da cobertura. O melhor resultado foi obtido com o isolamento da cobertura. Com as estratégias propostas, passava-se de nível D da envoltória no verão conforme avaliação no RTQ-R, para nível B, com custo total inicial estimado em torno de R\$ 3.780,00 por unidade. Isso, considerando valores de 2009. Entretanto, foi avaliado somente o custo capital.

3.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUA INTERAÇÃO COM A ENERGIA OPERACIONAL NAS EDIFICAÇÕES

Para Williams et al. (2012), devido à longa vida útil da maioria das edificações, as mudanças no clima podem influenciar tanto nas demandas energéticas para aquecimento e refrigeração, quanto nas emissões de gases de efeito estufa das edificações. Igualmente, podem ter também uma grande influência nos resultados do ciclo de vida da edificação e na relação entre as emissões de energia operacional e energia incorporada.

Por outro lado, o desempenho das edificações pode influenciar também nas mudanças climáticas, uma vez que edificações com baixo desempenho termoenergético podem demandar um maior consumo de recursos por conta da necessidade de climatização. Dessa forma, mudanças climáticas e o desempenho termoenergético das edificações encontram-se intrinsecamente relacionados.

De acordo com o quinto relatório do IPCC – AR5 (IPCC, 2014), o aumento das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera é uma das principais causas das mudanças climáticas e, independentemente das políticas que vêm sendo implementadas na mitigação das mudanças climáticas, as emissões de gases de efeito estufa devido à ação humana continuam aumentando. Dessa forma, está sendo cada vez mais forte a

evidência da influência humana tanto nas mudanças climáticas quanto no aumento da temperatura média na superfície do planeta, o que tem sido observado ao longo das últimas décadas.

Para os autores do relatório, com alto grau de confiança as mudanças climáticas causam um impacto em áreas urbanas para as pessoas e os ecossistemas. Esses impactos incluem o estresse pelo aumento das temperaturas e seus riscos associados, precipitações extremas, inundações, deslizamentos de terra, secas, poluição do ar, aumento do nível do mar e escassez de água, entre outros. Segundo os autores, as pessoas sem infra-estrutura essencial ou que vivem em áreas vulneráveis serão mais expostas a esses riscos.

3.2.1 Emissões de CO₂

Um dos grandes impactos considerados com o uso da energia nas habitações são as emissões de gases de efeito estufa e, em especial, as emissões de CO₂, que dependem da matriz energética usada. Dessa forma, assim como colocado anteriormente, boa parte das pesquisas de ACVE foca o impacto ambiental resultante nas emissões de CO₂ ou CO₂ equivalente.

Os gases de efeito estufa são substâncias que absorvem parte da radiação infravermelha, emitida, principalmente, pela superfície terrestre, e dificultam seu escape para o espaço. Isso impede que ocorra uma perda demasiada de calor para o espaço, mantendo a Terra aquecida. Entre os gases de efeito estufa que estão aumentando de concentração, o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) são os mais importantes, embora os CFC's também tenham a capacidade de reter a radiação infravermelha emitida pela Terra. Os gases de efeito estufa diferem, em sua influência, no aquecimento do sistema climático global devido às suas diferentes propriedades radiativas e ao tempo de vida na atmosfera (IPCC, 2007). Contudo, o CO₂ é o mais importante no efeito radioativo, sendo em torno de 55% das emissões causadas por ele, além de ser também o mais significativo em relação à produção dos materiais de construção (BUCHANAN; HONEY, 1994).

As influências no aquecimento global, considerando todos os gases de efeito estufa, podem ser expressas com o uso de uma medida comum: emissão de CO₂ equivalente (CO₂eq). A emissão de CO₂ equivalente é obtida multiplicando a emissão dos gases de efeito estufa pelo seu potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* – GWP) para um horizonte de tempo determinado. O *Common Carbon Metric*,

documento elaborado pela UNEP em 2010 como ferramenta para medição de emissões de CO₂ das edificações em uso, adota o GWP do CO₂ de 1, o metano 21 e o óxido nitroso 310, considerando um tempo de 100 anos. Dessa forma, uma mistura de gases de efeito estufa é obtida somando-se o equivalente de emissões de CO₂ de cada gás. A emissão de CO₂ equivalente é também uma medida padrão para comparar as emissões de diferentes gases de efeito estufa, mas não implica as mesmas respostas à mudança climática (IPCC, 2014).

Em 2009, na reunião das Nações Unidas de Copenhague (COP 15), foi previsto que deveriam ser realizados esforços mundiais para não superar em 2 °C o aumento da temperatura global acima dos níveis da época pré-industrial, como forma de manter uma situação de segurança global em relação às mudanças climáticas. Alguns países se comprometeram a fixar objetivos de redução de emissões de gases de efeito estufa até 2020, com metas variando conforme cada país. As metas poderiam ser de emissões totais, que variavam entre 15% e 39% com base nos anos 1990 ou 2005; ou de intensidade de carbono, variando entre 20% e 45% com base no ano de 2005 para alguns países (C2ES, 2013; DOE, 2010). A última reunião da COP 21, celebrada em dezembro de 2015 em Paris, manteve o limite dos 2°C; entretanto, também estabeleceu que devem ser feitos esforços para que o aumento não supere 1,5°C, colocando como esforço, principalmente, o limite das emissões de dióxido de carbono. O Brasil comprometeu-se com uma redução de 37% das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) projetadas para 2025 e 47% até 2030 (BRASIL, 2015)⁹. Para McKinsey (2009), o potencial de redução pelas edificações seria suficiente para conter o aquecimento global abaixo dos 2°C, pois, considerando as tecnologias disponíveis no momento, é possível fazer-se reduções de 30% e 50% até 2030 sem grande aumento de custos (IPCC, 2007).

As emissões de carbono relacionadas ao uso de energia dependem do tipo de combustível usado, visto que a energia obtida de combustíveis fósseis produz maiores emissões, enquanto a energia renovável produzida no local pode causar emissão zero. Isso faz com que a energia operacional e o carbono emitido na operação da edificação sejam de alguma forma, proporcionais para uma dada mistura de combustíveis. Por isso, às vezes,

⁹ O Brasil instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei nº-12.187/2009, que define o compromisso nacional voluntário de adoção de ações de mitigação com vistas a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020. Fonte: Brasil (2014).

os termos são confundidos. Por outro lado, a energia incorporada e o carbono incorporado não têm a mesma relação, porque, dependendo do processo, os materiais podem emitir ou sequestrar carbono. Um exemplo disso é o cimento, que emite perto da metade do seu carbono incorporado e não está relacionado ao uso de energia, senão a um processo químico próprio, enquanto a madeira sequestra carbono durante o seu processo de crescimento (AYAZ; YANG, 2009). Por outro lado, o carbono incorporado nos materiais depende também da matriz energética da produção dos mesmos.

Para o cálculo de emissões nas edificações, é importante considerar que as emissões provenientes do consumo de energia devem ser quantificadas com métodos que se baseiam em fatores de emissão (coeficientes que descrevem a quantidade de gases de efeito estufa liberado para determinada atividade, com valores padrão baseados em uma amostra representativa de dados). As emissões podem variar geograficamente ou tecnologicamente. As emissões anuais de gases de efeito estufa relacionadas à operação da edificação podem ser determinadas associando a demanda energética ao combustível usado antes de aplicar o fator de intensidade do combustível (Williams et al. 2012).

A pesquisa de Li et al. (2013) propôs um novo conceito para os edifícios residenciais chamado de eficiência de carbono no ciclo de vida (*life-cycle carbon efficiency*), no qual associa a emissão de CO₂ no ciclo de vida com o valor de criação. O conceito é definido como a razão entre o valor do ciclo de vida da edificação pela sua emissão de carbono. Os autores tomaram como base a definição proposta pelo WBCS, em que a eco-eficiência é igual à razão do valor do produto ou serviço com relação a carga ambiental. A metodologia foi testada no projeto de um estudo de caso de um edifício residencial multifamiliar de cinco andares na cidade de Nanjing (China). Foram consideradas cinco etapas no ciclo de vida, que incluíam a preparação dos materiais de construção, a construção da edificação, a operação do edifício, a demolição e a disposição dos resíduos de construção e demolição. A emissão de carbono no ciclo de vida foi calculada em cada fase com base na energia e nos recursos consumidos; o valor do ciclo de vida foi representado pela vida útil do edifício em anos; sua área, em m²; e sua altura, em metros. As emissões de carbono do edifício foram consideradas como a somatória das emissões nas cinco fases propostas. Dos 30 principais materiais detectados na edificação, Li et al. (2013) escolheram nove como os que têm maior contribuição nas emissões de carbono. Para a fase de

demolição, os autores sugeriram, com base em outros estudos da China, que fosse considerado como 90% da energia incorporada na etapa de construção, isso difere, em muito, do estudo de Tavares (2006) no Brasil, que obteve valores em torno de 10% para essa fase. Como resultado, as emissões de carbono do ciclo de vida encontradas na edificação foram de 1.807,31 t, sendo as maiores, as emissões da fase operacional, com 66%. As emissões da primeira fase de extração de materiais foi a segunda em ordem de importância, com 24%. Para os autores, o indicador pode ajudar projetistas e encarregados de políticas públicas nas fases iniciais de projeto.

No Brasil, o Ministério da Ciência e Tecnologia apresenta dois tipos de fatores de emissão para a intensidade de carbono da geração elétrica, um usado para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e outro um fator médio para utilizações do Sistema Interligado Nacional. No caso deste último em 2014 o fator de emissão foi de 0,1355 tCO₂/MWh (0,1355 kgCO₂/kWh) e em 2015 de 0,1244 tCO₂/MWh (BRASIL; MCT, 2015). Embora baixo quando comparado com outros países, tem tido um grande aumento nos últimos anos. Para 2030, as previsões do PNE 2030 (BRASIL; MME; EPE 2007) estimam 97 milhões de toneladas de CO₂ para a energia total do país, 10% delas correspondentes às emissões pela eletricidade. Nos quatro cenários do PNE o consumo de eletricidade em 2030 está estimado em 953,6 TWh para o cenário A, 748,6 TWh para o cenário B1, 565,9 TWh para o cenário B2 e 429 TWh para o cenário C. Considerando a média dos quatro cenários, obtém-se um fator de emissão de 0,156 kgCO₂/kWh. Como pode ser observado, o fator de emissão atual já se encontra muito próximo do esperado em 2030.

Com relação à intensidade de emissão média em CO₂ equivalente no Brasil, foi em 2014 de 0,137 tCO₂eq/MWh (BRASIL; EPE, 2015) apud (ELETROBRAS, 2015) e, segundo dados do mesmo autor, em 2014 a emissão de CO₂ respondeu por cerca de 98,9% da emissão de CO₂eq na matriz elétrica brasileira.

3.2.2 Cenários de emissão

O Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC) é resultado da união da Organização Meteorológica Mundial (WMO) e do Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP) para produzir informações de cunho científico, técnico e socioeconômico para o entendimento das mudanças climáticas produzidas pelo homem. Desde a

sua fundação, em 1988, tem produzido uma série de documentos usados como referências para o entendimento das causas das mudanças climáticas, seus impactos e possíveis estratégias de resposta. Também fornece, a pedido, conselho técnico e científico na Conferência das Partes (COP) como parte da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) (UNEP; WMO; IPCC, 2000).

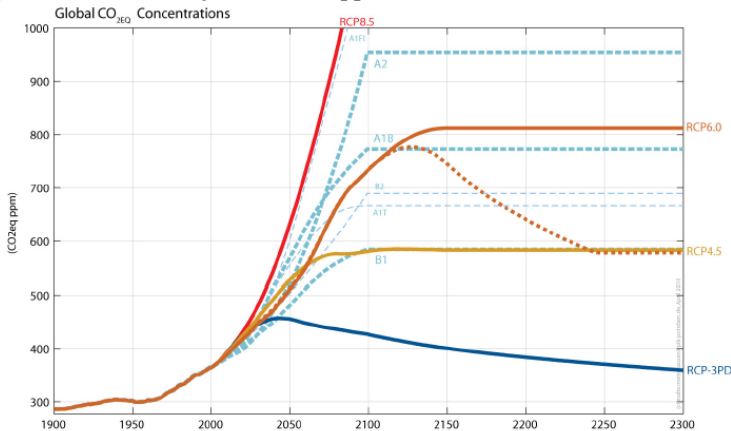
Para análise dos impactos, o IPCC estabelece cenários futuros de possível desenvolvimento, a partir dos quais são avaliadas alternativas para mitigação ou adaptação. Desde 1990 têm sido produzidos cenários de emissões possíveis de gases de efeito estufa usados para modelos de cenários de mudanças climáticas. Em 1996 foi desenvolvido um novo conjunto de cenário de emissões que substituiu o de 1992 e publicado um Relatório Especial em Cenários de Emissão (*Special Report on Emissions Scenarios – SRES*) (UNEP; WMO; IPCC, 2000). Os cenários do SRES foram usados no terceiro (2001) e no quarto relatório do IPCC de 2007. No quinto e mais recente relatório (AR5), publicado no final de 2014, foi decidido adotar um novo conjunto de cenários produzidos pela comunidade científica (IPCC, 2016).

Os cenários são probabilidades de como pode ser o futuro; porém, têm um alto grau de incerteza. Podem ajudar na análise de mudanças climáticas, na avaliação de impactos, na adaptação e mitigação. Entretanto, deve ser considerado que nenhum cenário tem maior probabilidade de ocorrência do que outro. Os cenários dos SRES cobrem diferentes alternativas de evolução demográfica, econômica e tecnológica. Para a sua criação foram divididas quatro grandes linhas de evolução, em que cenários da mesma linha constituem uma “família” (UNEP; WMO; IPCC, 2000). Assim, as quatro principais linhas de evolução, criam quatro cenários de famílias: A1, A2, B1 e B2. Dessas famílias, saem seis grupos de cenários com diferentes características. Das famílias A2, B1 e B2, unicamente sai um grupo de cenário de cada uma. Da família A1, saem três grupos de cenários com diferentes características de desenvolvimento energético: A1F1, A1B e A1T. Dentro de cada família e grupo de cenários, alguns apresentam hipóteses harmonizadas em relação à população global, produto mundial bruto e energia final. Outros exploram incertezas em relação a esses assuntos e são marcados como OS. Para cada categoria de hipóteses harmonizadas e OS são desenvolvidos alguns cenários. Para cada um dos seis grupos de cenários é mostrado um cenário ilustrativo que é sempre harmonizado. E para cada uma das quatro famílias de cenários é mostrado um cenário ilustrativo, considerado pelo grupo que os desenvolveu como ilustrativos

de cada uma das linhas de evolução. No total, no SRES são apresentados 40 cenários (UNEP; WMO; IPCC, 2000).

No relatório AR5 no lugar de cenários com base socioeconômica foram estimados um número limitado de alternativas chamadas de *Representative Concentration Pathways* (RCPs) com base nas concentrações de gases de efeito estufa, de forma a representar caminhos representativos de futuros climáticos. Quanto à diferença dos outros cenários, esses não foram desenvolvidos especificamente pelo IPCC, senão pela comunidade científica, sendo o papel do IPCC de avaliá-los e analisá-los. Esses cenários podem resultar de diferentes combinações em questões econômicas, tecnológicas, demográficas, políticas e institucionais (IPCC, 2016). Foram selecionados 4 RCPs em função do seu caminho de força radioativa até 2100. A força radioativa é definida pelo IPCC (2016) como a “medida cumulativa de emissões humanas de gases de efeito estufa de todas as fontes expressa em Watts por metro quadrado”. Os cenários são RCP 2,6 - 4,5 - 6 e 8,5. A Figura 12 mostra a comparação na tendência entre os cenários do Relatório 3 e 4 e do Relatório 5 do IPCC. Os cenários A2 e A1F1 do Relatório 3 e 4, e RCP 8,5 do Relatório 5 são considerados de alta emissão.

Figura 12 – Concentrações de CO₂eq para os diferentes cenários.



Fonte: Malte Meinshausen in (IPCC; YPERSELE, 2010).

As previsões globais dos cenários ajudam na definição dos modelos climáticos futuros. Existem vários modelos matemáticos que têm sido desenvolvidos para projeção do clima no futuro. São quatro os principais modelos que diferem em nível de complexidade, o RC, o BEM,

o DE e o MCGs ou GCMs. Estes últimos, modelos de circulação geral, são os mais complexos, pois levam em consideração muitos dos processos físicos relevantes para o clima, compreendendo a latitude, a longitude e a altura. Também acoplam um modelo de circulação geral oceânica (CASAGRANDE, 2013).

Os relatórios do IPCC mostram os dados obtidos por meio da construção dos GCMs pelos distintos colaboradores no mundo todo, por isso podem ter diferenças entre os diversos modelos (CASAGRANDE, 2013). Os GCMs são construídos com base nos cenários estimados pelo IPCC. Existem vários modelos; entretanto, um dos modelos globais aceitos pelo IPCC e dos mais usados nos seus terceiro e quarto relatórios é o *Hadley Centre Coupled Model version 3* (HadCM3). É um modelo de circulação geral que tem acoplado um modelo de circulação atmosférica oceânica. As simulações são realizadas geralmente considerando 360 dias com meses de 30 dias. Segundo Robert e Kummert (2012), o HadCM3 é um modelo com ponto de malha com células a cada 2,5° na latitude e 3,75° na longitude, sendo o tamanho da célula de aproximadamente 300 km x 300 km. Esse tamanho de células é típico de modelos GCM, sendo a resolução temporal desse tipo de modelos limitada, pois normalmente são dados valores de médias mensais para alguns horizontes de tempo que representam condições médias de um período. Tipicamente, o ano 2020 representa o período de 2011 a 2040, e o ano de 2050 representa o período de 2041 a 2070.

No Brasil, o projeto “Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI” forneceu informações para projeções climáticas futuras no país. Para as projeções futuras, usou os modelos climáticos do 3º Relatório do IPCC, entre eles, o modelo climático do Hadley Centre. No projeto, foram realizadas análises mais detalhadas para as regiões de Amazônia, Pantanal, Nordeste e bacia do Paraná–Prata (MARENGO, 2006). Segundo Marengo (2006), observou-se aumento gradual da temperatura para todas as regiões, cujos valores mais elevados na taxa de aquecimento foram observados na Floresta Amazônica, e os menores, nos estados do Sudeste junto à costa.

Posteriormente, e a exemplo do IPCC foi criado em 2009 o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), que sintetiza informações relevantes para o Brasil com relação às mudanças climáticas. Os resultados do primeiro relatório publicado em 2013 concordam com as projeções do IPCC em relação ao aumento de temperatura e eventos extremos, em que a tendência para todo o Brasil indica o aumento da

temperatura e de extremos de calor (MARENCO, 2014). Em virtude disso, considera-se de extrema importância considerar a influência das mudanças climáticas no comportamento termoenergético futuro das edificações no país.

3.2.3 Arquivos climáticos futuros para simulação termoenergética de edifícios

Simulações termoenergéticas podem ser usadas para prever o comportamento dos edifícios frente a questões como mudanças climáticas com o uso de arquivos climáticos futuros. Isso pode ajudar a encontrar respostas que indiquem a direção na qual seja alcançado um melhor desempenho térmico e energético ao longo do ciclo de vida do edifício, com menor consumo de energia e emissões de CO₂.

Conforme Dascalaki et al. (2011), tipologias de edificações podem ser usadas para avaliar o desempenho energético de grupos de edifícios, edifícios individuais ou ainda avaliar cenários com medidas de conservação de energia no estoque edificado. Para as avaliações, podem ser usados edificações reais ou projetos representativos do setor. A definição desses modelos é importante para o avanço de pesquisas na área de eficiência energética e redução de emissões de CO₂. Para Kavgic et al. (2010), a execução eficiente e racional da construção de ações, estratégias e políticas de redução de emissão de CO₂ requer a aplicação de modelos de edifícios completos que tenham a capacidade de: estimar a demanda inicial de energia do setor; explorar os efeitos técnicos e econômicos de diferentes estratégias de redução de emissão de CO₂ ao longo do tempo; e identificar o efeito de estratégias de redução de emissões sobre a qualidade do ambiente interior. Para Attia, Evrard e Gratia (2012), os modelos representativos para o setor residencial podem ser desenvolvidos a partir do levantamento de informações relevantes ao setor, contidas em pesquisas de abrangência nacional.

Para isso, a Agência Internacional de Energia (IEA) define dois métodos de modelagem fundamentais para prever e analisar aspectos associados ao uso da energia e de emissões de CO₂ dos edifícios: o método *bottom-up* e o método *top-down*. A abordagem de modelagem *top-down* tende a ser utilizada para investigar inter-relações entre o setor de energia e a economia em geral; entretanto, pode não ser apropriada para lidar com questões de mudanças climáticas, por serem considerados no modelo dados passados (KAVGIC et al., 2010). Dentro do modelo *bottom-up*, encontram-se duas abordagens, uma com base na estatística e

outra com base na física das edificações. As técnicas de modelagem desta última incluem a consideração de amostras de edifícios representativos do setor nacional (SHORROCK; DUNSTER, 1997). Conforme Kavgic et al. (2010), entre os benefícios da técnica *bottom-up* se encontram a possibilidade de descrever o uso de tecnologias em detalhe, usar dados fisicamente mensuráveis, ajudar nas políticas a orientar-se mais adequadamente no consumo, permitir avaliar e quantificar diferentes tecnologias com relação ao consumo de energia e estimar combinações adequadas para uma determinada demanda. Os modelos *bottom-up* são utilizados para testar diferentes cenários com incorporação de tecnologias para atingir certos alvos de energia ou emissão. Por outro lado, entre as limitações destacam-se não proporcionar relações muito adequadas entre uso de energia e atividades macroeconômicas, necessidade de muitos dados técnicos e o comportamento humano ser dado por meio de suposições externas.

Com relação a isso, estudos no setor de edificações existentes são numerosos (BALARAS et al., 2007; DALL'O' et al., 2012; NIK; KALAGASIDIS, 2013; THEODORIDOU et al., 2011), mas usualmente não abordam tipologias de edifícios recentes em detalhe.

Por outro lado, para simulações do comportamento termoenergético dos edifícios, é necessário o uso de arquivos climáticos anuais com base horária. Entretanto, muitos dos arquivos climáticos ainda usados nas simulações, em especial no Brasil, são de dados obtidos no período de 1961 a 1990, ou muitas vezes de 1976 a 2005, o que não reflete a tendência atual das mudanças no clima. Dessa forma, não é possível julgar, de maneira muito efetiva, o comportamento ou conforto térmico futuro dos edifícios que são desenhados e construídos hoje.

Atualmente, há interesse crescente no tema. Robert e Kummert (2012) afirmaram que não há dúvidas de que as mudanças climáticas terão impacto no desempenho dos edifícios e no conforto dos usuários. Os autores ainda manifestaram que edifícios mais sensíveis às mudanças no clima, tais como os que pretendem ter zero consumo de energia deveriam ser sempre desenhados com simulações termoenergéticas que considerem dados do clima futuro com base nas mudanças climáticas e ainda a sua variação anual. Contudo, acredita-se que a necessidade de incluir as mudanças climáticas nas simulações das edificações não deveria ser recomendado somente para edifícios que buscam zero consumo de energia ou de emissões de gases de efeito estufa.

Há vários métodos para obter arquivos climáticos futuros para simulação termoenergética (GUAN, 2009); e metodologias para o seu

desenvolvimento são geralmente baseadas em estatísticas (KIKUMOTO et al., 2014) ou no método *morphing* (JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2008). Pesquisadores como Van Hooff et al. (2014) preferem usar dados locais de um ano passado que tenha sido mais quente como representativo do cenário futuro, defendendo seu uso enquanto não há dados regionais disponíveis. Em países como a Inglaterra, estão disponíveis dados regionais para vários cenários e em escala adequada para investigar mudanças climáticas futuras por meio de simulação computacional. Porém, para todos os países o IPCC disponibiliza informações sobre mudanças climáticas por meio do seu banco de dados; entretanto, sem a precisão da escala regional.

Entre as diferentes abordagens para a obtenção de dados do clima futuro, o método *morphing* desenvolvido por Belcher, Hacker e Powell (2005), é muito aceito hoje em dia. O método combina dados de arquivos climáticos atuais com os resultados dos modelos climáticos de circulação geral e gera uma série de dados do clima, que incorporam as condições médias do clima nos cenários climáticos futuros com a preservação de sequências no tempo que sejam realísticas (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005). Os arquivos climáticos usados como baseline podem ser TRY ou TMY; e os cenários de mudanças climáticas são dados para uma certa região. As transformações nos dados podem ser um deslocamento para ajustar as médias mensais, um ajuste na dispersão mensal ou a combinação das duas (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

Um método para desenvolvimento de arquivos climáticos futuros com base na metodologia de Belcher, Hacker e Powell (2005) foi proposto por Jentsch, Bahaj e James (2008) para adaptar os arquivos *EnergyPlus Weather Files* (EPW) usados para simulação no *Energy Plus*, de forma a incorporar as previsões de mudanças climáticas. Toma como base os resultados dos cenários climáticos do modelo HadCM3 do cenário A2 do terceiro relatório, cujos valores estão disponíveis no centro de distribuição de dados do IPCC (IPCC, 2011). O A2 nos cenários do SRES é considerado o cenário que representa uma tendência atual no mundo, sendo tratado como de alta emissão, de acordo com o que foi indicado anteriormente. No método, os arquivos climáticos existentes são modificados com as principais previsões dadas pelo modelo HadCM3, em relação ao período-base de 1961–1990.

Com esse propósito, foi desenvolvida a ferramenta *Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data* (CCWorldWeatherGen), a qual permite gerar arquivos climáticos futuros

para qualquer local no mundo (JENTSCH et al., 2009; JENTSCH, et al., 2013). Os períodos que estão configurados na ferramenta tomam como base os horizontes de tempo típicos, considerados no modelo HadCM3, que são o ano 2020 para considerar como média do período de 2011 a 2040; o ano de 2050 para o período de 2041 a 2070; e o ano de 2080 para o período de 2071 e 2100. Análises considerando os três períodos são importantes para prever a adaptação das edificações durante todo o ciclo de vida (CASAGRANDE, 2013). Por outro lado, os cenários do último relatório (AR5) consideram como horizontes de tempo o futuro próximo, o futuro médio e o futuro distante.

O problema é que a ferramenta *CCWorldWeatherGen* não usa dados dos mais recentes relatórios do IPCC e somente representa um cenário. Além disso, Jentsch et al. (2013) levantaram incertezas na metodologia *morphing*, tais como a validade dos dados dos GCM e a representatividade da grade para o local em estudo e do arquivo EPW atual para os arredores. Os autores também levantaram algumas limitações importantes como a possibilidade de sub ou superestimar impactos das mudanças climáticas, fornecer valores reais com os procedimentos de mudança, criar diferentes relações entre parâmetros e não levar em conta eventos extremos, uma vez que toma como base médias mensais. Com relação a essas considerações, os autores informaram que os dados lançados no quarto relatório do IPCC não estavam completos para os cálculos necessários ao método *morphing*, tendo unicamente o modelo HadMC3 no cenário A2 todos os dados requeridos de forma disponível para a conversão de arquivos. Igualmente, os autores fizeram um estudo comparativo com o uso de dados disponíveis no banco de dados mundial e dados regionais para mostrar a viabilidade da aplicação da ferramenta *CCWorldWeatherGen* em diferentes regiões do mundo (JENTSCH et al., 2013). O estudo indicou que para climas temperados com influência marítima, a simulação de edifícios utilizando os dados meteorológicos transformados do modelo HadCM3 poderia subestimar os impactos sobre as mudanças climáticas, quando comparada com o uso de dados regionais e que, geralmente, o desvio no resultado poderia aumentar no clima de mais longo prazo. Como conclusão, consideraram que até que os dados regionais sejam mundialmente mais acessíveis, arquivos climáticos futuros produzidos por meio do método *morphing* com dados dos modelos de circulação geral e com o uso da ferramenta *CCWorldWeatherGen* podem ser considerados como uma abordagem prática para a obtenção de arquivos climáticos, de forma a avaliar as mudanças climáticas no ambiente

construído. Nesse sentido, acredita-se que os dados disponibilizados pelo IPCC possam ser usados para prever as tendências de comportamento térmico dos edifícios nos cenários climáticos futuros, no lugar de ser utilizados atualmente como respostas precisas.

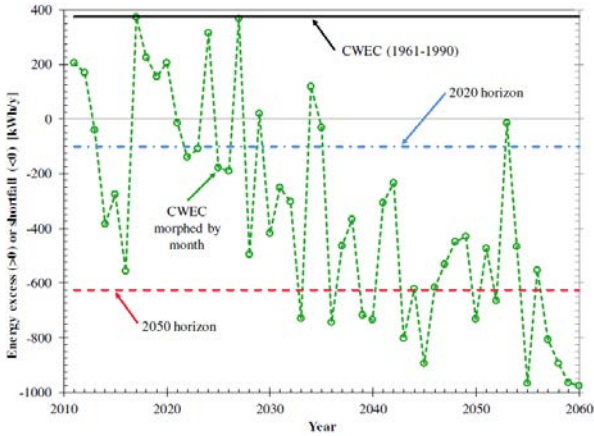
Outras ferramentas para a conversão de arquivos climáticos futuros estão sendo desenvolvidas na atualidade, como a ferramenta *Weather Shift*, desenvolvida em parceria entre a empresa de consultoria Arup e o *Argos Analytics* para uso interno da Arup. No *site* da ferramenta disponibilizam-se alguns dados climáticos para vários locais do mundo, entre eles o Brasil, considerando os cenários do quinto relatório: RCP 4.5 e RCP 8.5, com diferentes percentuais de aquecimento para cada cenário que variam entre 10, 25, 50 (médio), 75, 90 e 95% (mais quente). Os dados climáticos considerados são da base de dados do Departamento de Energia dos Estados Unidos; no caso das cidades de São Paulo e Salvador, os dados correspondem à base da SWERA. Observações como médias mensais dos arquivos climáticos futuros, entre outros dados, são gratuitas, entretanto, os arquivos finais para simulações de clima futuro em base horária são restritos.

O estudo de Williams et al. (2012) é um dos poucos encontrados que propõe uma metodologia que incluiu a influência das mudanças climáticas na análise das emissões de GEE no ciclo de vida do edifício, por meio da inclusão de arquivos climáticos futuros na fase operacional. A pesquisa usou dados de clima futuro do *UK Climate Impacts Programme* (UKCIP). Em 2009, o UKCIP disponibilizou um novo conjunto de projeções do clima, no Reino Unido, o *UK Climate Projections* (UKCP09). As projeções incluíam uma indicação probabilística do grau de mudança das variáveis climáticas mensais, sendo a posição de 10% uma projeção em que é difícil que as mudanças sejam menores do que o valor adotado; enquanto a posição de 90% de probabilidade significa que mudanças maiores do que essas também são pouco prováveis. A metodologia do UKCIP propõe que devem ser aplicados três cenários de emissão conforme cenários do SRES: (B1) considerado baixo, (A1B) médio e (A1F1) alto, analisando para cada um dos cenários, os horizontes de tempo de 2020, 2050 e 2080, representados com a posição percentual de 10% para 2020, 50% para 2050 e 90% para 2080. Na metodologia, todos os cenários são considerados como prováveis de acontecer na mesma proporção, assim todos são investigados. Os autores aplicaram a metodologia proposta em um empreendimento de uso misto no Reino Unido. Os resultados mostraram que, embora a demanda para refrigeração tenha aumentado entre 2020 e

2080 de 26% a 70% ao longo do ciclo de vida, dependendo do cenário aplicado, foi observada pouca variação nas emissões totais de GEE no ciclo de vida considerando os três cenários, sendo 3% dos cenários B1 e A1F1 com relação ao cenário médio.

Por outro lado, e em contraponto à análise por horizontes de tempo, que representam valores médios de períodos, a metodologia indicada por Robert e Kummert (2012) propõe o uso de arquivos climáticos futuros para a simulação com variação anual, usando para a sua criação a metodologia *morphing*. Os autores defendem que dessa maneira é analisado, de forma mais precisa, o impacto das mudanças climáticas nos projetos. Para aplicação da metodologia, foi considerado o uso do cenário A2 do SRES e o modelo HadCM3. Para isso, criaram uma série de 50 anos para um arquivo climático futuro a ser aplicada em dois casos, em diferentes cidades. Os resultados foram comparados em relação a quatro arquivos climáticos: arquivo base de 1961–1990, horizonte de 2020, outro de 2050 e, por último, um arquivo que usa a metodologia *morphing* para obter variações anuais nos 50 anos considerados, utilizando médias mensais. A Figura 13 mostra o balanço energético anual em termos de excesso de energia, o qual pode ser positivo ou negativo para o arquivo com variação mensal, dependendo do ano, enquanto para o horizonte de 2020 e 2050 é sempre negativo. A metodologia mostrou-se muito útil quando são necessários dados mais aprofundados em relação à variação anual, muito importante para certas estratégias de eficiência energética, porém se torna uma metodologia mais complexa para a obtenção dos arquivos climáticos.

Figura 13 – Excesso de energia anual para os diferentes arquivos climáticos.



Fonte: Robert e Kummert (2012).

Por outro lado, trabalhos como o de Gupta e Gregg (2012) propõem concentrar o estudo no cenário de altas emissões e na perspectiva de 90%. Os autores justificam a escolha porque no caso das edificações um projeto que apresente bom desempenho em um cenário de altas emissões deve ser o mais resiliente para adaptação a qualquer cenário.

No Brasil, pesquisadores estão trabalhando no desenvolvimento de dados regionais para a estimativa de clima futuro, mas só recentemente começam a ser observadas publicações com o uso de arquivos mais locais para a simulação termoenergética de edifícios, como o caso da pesquisa de Alves, Duarte e Gonçalves (2015a). Para este estudo, pesquisadores do IAG-USP fizeram uma análise com base nos dados climáticos medidos por eles na estação meteorológica da Universidade de São Paulo. Os dados medidos usados foram médias mensais e anuais de janeiro de 1933 a abril de 2014. Para os climas futuros os dados foram tratados em escala global e regional a partir dos seguintes modelos: regional RegCM4 e global MPI (*Max-Planck Institute for Meteorology*). O cenário utilizado foi o RCP 8,5 do último relatório do IPCC. Os cenários que foram simulados em escala global e regional são caracterizados como presente (dados de 1975 a 2005), futuro próximo (2015 a 2044), futuro intermediário (2045 a 2074) e futuro distante (2076 a 2096). Para a conversão de arquivos futuros, somente foram modificadas as variáveis de temperatura e umidade, deixando as outras fixas. A justificativa dessa decisão é de que essas variáveis são as mais significativas para mudança

climática. Contudo, consideram-se outras variáveis como a radiação solar, ventos, e temperatura do solo, significativas para o comportamento termoenergético dos edifícios. Para a simulação de edificações no Brasil a temperatura do solo é uma das variáveis importantes, em especial da tipologia térrea. A mesma não foi modificada na pesquisa dos autores apresentados, o que é possível fazer com o uso da ferramenta *CCWorldWeatherGen*. A Tabela 6 mostra os resultados na variação de temperatura e umidade na cidade de São Paulo nos cenários simulados por Alves, Duarte e Gonçalves (2015a). Considerando as médias de temperatura e umidade entre 1940 a 2000, teve-se um aumento na temperatura de aproximadamente 2°C passando de 17,7°C a 19,5°C e redução de 5% na umidade passando de 85,1% a 80,0%. Os autores fazem a observação que a estação metereológica da USP encontra-se localizada em um parque e, portanto, os efeitos microclimáticos urbanos são reduzidos.

Tabela 6 – Variação dos dados climáticos nos cenários simulados pelo IAG-USP.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
Presente	21,2	20,9	19,9	18,1	16,3	14,8	13,7	14,3	16,1	17,8	18,6	19,8	17,6
Futuro Próximo	21,8	21,9	20,8	19,0	17,3	15,5	14,8	15,4	17,5	19,0	19,4	20,5	18,6
Futuro Médio	22,8	22,7	21,9	20,2	18,4	16,8	15,9	16,8	19,4	20,3	21,2	21,9	19,9
Futuro Distante	24,4	23,6	22,8	21,1	19,7	18,0	16,6	18,3	20,5	22,4	22,3	23,1	21,1

(a) Médias mensais de temperatura

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
Presente	81,7	82,2	83,4	82,5	80,8	79,3	78,6	77,2	77,3	78,8	79,5	81,3	80,2
Futuro Próximo	81,9	83,1	83,5	82,2	80,5	79,7	78,6	77,6	77,2	78,2	80,6	81,5	80,4
Futuro Médio	82,2	83,6	83,4	82,9	80,6	79,9	78,9	77,4	74,4	78,4	80,2	82,1	80,3
Futuro Distante	81,7	82,1	83,0	81,8	80,4	79,1	79,3	75,9	71,3	72,4	79,0	80,9	78,9

(b) Umidade relativa

Fonte: Alves, Duarte e Gonçalves (2015a).

Foi observado que algumas pesquisas têm relacionado a inclusão de arquivos climáticos futuros na análise do desempenho termoenergético dos edifícios; porém, poucas têm incluído a avaliação de mudanças climáticas na análise do ciclo de vida dos edifícios.

A seguir são apresentadas com mais detalhes algumas pesquisas que abordam o estudo de incorporação de estratégias de eficiência energética nas edificações diante das mudanças climáticas.

3.2.4 Incorporação de medidas de eficiência energética nas edificações considerando a adaptação às mudanças climáticas

Neste estudo, o foco nas mudanças climáticas foi colocado somente nas questões relacionadas ao desempenho termoenergético da edificação.

Existem duas abordagens diferentes para estratégias com relação às mudanças climáticas relacionadas com os edifícios: mitigação e adaptação. A mitigação do clima aborda a redução nas emissões de gases de efeito estufa e, em consequência, do aquecimento global. A adaptação se refere às alterações climáticas e visa ajustar as ações para lidar com as mudanças climáticas já presentes ou aquelas que muito provavelmente ocorrerão como resultado do cenário atual de emissões de GEE. Esta última pode ser realizada permitindo a capacidade de adaptação por meio de melhor desempenho energético do edifício (REN; CHEN; WANG, 2011). Para a *European-Commission* (2015), um dos exemplos dessas medidas é a adaptação das normas dos edifícios a condições climáticas futuras e eventos de clima extremo.

Estudos para a avaliação da eficiência energética ou de estratégias de adaptação contra as alterações climáticas estão aparecendo, especialmente em países em desenvolvimento que têm clima mais frio (KERSHAW; EAMES; COLEY, 2011; GUPTA; GREGG, 2012; PORRITT et al., 2011; VAN HOOFF et al., 2014) cujos dados de clima futuro encontram-se disponíveis.

Ren et al. (2011) fizeram uma pesquisa em adaptação às mudanças climáticas para edificações residenciais australianas. Nela investigaram caminhos com potencial de adaptação com o uso de simulação e custo efetivo para edifícios novos e existentes em oito zonas bioclimáticas empregando três tipos de arquivos climáticos. Para os autores, as medidas de adaptação às mudanças climáticas devem ser abordadas para o desenho e a operação das edificações. Como indicadores para a avaliação, foi considerado que o consumo energético e as emissões de GEE na vida útil não fossem superiores aos níveis atuais. As estratégias abordadas basearam-se na casa australiana de emissão zero, a qual levantou três formas de redução do consumo energético para o setor residencial na Austrália, isto quando não considerado o comportamento do usuário como uma variável. São elas: melhoria do desempenho energético da envoltória, equipamentos energeticamente eficientes e uso de energia renovável no local. Os autores indicam também como abordagem para a redução das emissões de carbono a mudança no uso de combustível com o emprego de fontes alternativas de baixa emissão. Entretanto, esta última estratégia não foi abordada no seu estudo para ver o impacto das outras

estratégias, considerando as mesmas circunstâncias. Da mesma forma, não foi abordado o efeito das mudanças climáticas no aquecimento de água, por não serem encontrados dados confiáveis disponíveis e pelo baixo impacto quando comparado com o condicionamento ambiental. Os resultados do estudo mostraram que a iluminação e os equipamentos não são muito sensíveis ao aquecimento global, sendo dominantes nesse quesito os usos finais de resfriamento e aquecimento. Também concluíram que, em climas em que a maior preocupação é o aquecimento, é possível ter um nível adequado de adaptação com melhoria da envoltória em termos de eficiência energética. Para climas com maior necessidade de resfriamento, somente pode ser alcançado quando, além da envoltória se têm equipamentos eficientes e energia renovável. Outra conclusão foi de que edifícios com alto nível de eficiência energética são mais sensíveis a mudanças relacionadas ao aquecimento global.

Outro estudo proposto por Van Hooff et al. (2014) avaliou seis medidas passivas para a adaptação às mudanças climáticas para três edificações típicas de dois períodos temporais diferentes localizadas na Holanda. O indicador de desempenho usado na avaliação foi o número de horas de superaquecimento ao longo do ano. As estratégias foram analisadas de forma paramétrica, isto é, uma por vez, considerando o caso base. As medidas investigadas foram o aumento da resistência térmica, a mudança na capacidade térmica, o aumento da reflexão de onda curta (albedo), o teto jardim, o sombreamento e a ventilação natural adicional. Os resultados indicaram que o sombreamento e o incremento na ventilação natural foram as medidas mais efetivas. Além disso, mostraram que, para edifícios com maior isolamento, são necessárias medidas adicionais. De forma similar, Gupta e Gregg (2012) estudaram sete opções de adaptação para quatro tipologias típicas de habitação na Inglaterra. De forma geral, o sombreamento com controle do usuário se mostrou como a melhor estratégia para a adaptação. Entretanto, nenhuma poderia, por si só, eliminar o risco de superaquecimento nas casas, considerando o ano de 2080.

No setor de habitação de interesse social há alguns estudos que abordaram o problema de medidas de adaptação às mudanças climáticas. Roders e Straub (2014) fizeram um estudo qualitativo sobre a probabilidade de adoção de cinco medidas de adaptação no estoque edificado de associações de habitação na Holanda. Os resultados mostraram que as mudanças climáticas não são ainda um foco importante para as políticas públicas nas associações de habitação. Contudo, muitas associações viram o tema como uma oportunidade caso fosse possível

fornecer-lhes um espectro de estratégias de implementação em que pudessem selecionar tendo em mente a combinação mais adequada. A pesquisa mostrou que, devido as associações trabalharem com dificuldades financeiras, medidas de adaptação não são consideradas importantes no momento. Entretanto, os autores ressaltam que medidas de adaptação contribuem para o princípio social do setor, por causa da obrigação legal de prover habitações de qualidade agora e no futuro, manter o valor da propriedade e evitar impactos econômicos futuros ao país. Para os autores, as questões de adaptação estão sendo consideradas em alguns exemplos na União Europeia, porém é necessária uma política em larga escala.

No Reino Unido as habitações sociais novas devem ser construídas com ao menos o nível 3 do “*Code for Sustainable Homes*”. Para o setor privado, o cumprimento com o código é voluntário; entretanto, a avaliação do nível de desempenho energético é obrigatória para todas as casas (BOOTH; HAMMOND, 2012). Igualmente, têm sido importante ações como o *Innovate UK’s Design for Future Climate, Adapting Buildings (D4FC) Programme* em que foram selecionados e apoiados projetos no país para desenhar estratégias com foco na resiliência e na adaptação ao clima futuro (THOMPSON; COOPER; GETHING, 2015).

Também para Charoenkit e Kumar (2014), a redução das emissões de gases de efeito estufa considerando o ciclo de vida do edifício e as alterações climáticas têm sido recentemente questões importantes para o desenvolvimento da habitação social. Os autores analisaram cinco ferramentas de avaliação bem conhecidas sobre como abordam esses temas, sintetizando os critérios avaliados nesses quesitos por cada ferramenta. Ressalta-se aqui um dos critérios abordados pelo BREEAM para a resiliência das edificações: existirem edificações elevadas do nível do piso, considerando ao menos 60 cm em locais com possíveis inundações. Esse critério, aparentemente não relacionado com a redução de emissões ou o consumo energético, poderia afetar muito o desempenho térmico de edifícios térreos, já que não estariam na condição de contato com o solo. Para os autores, a má qualidade e a infra-estrutura da habitação social tornam-na mais vulnerável a desastres naturais, um tema que é menos considerado.

Para países em desenvolvimento como o Brasil, até o momento observa-se poucas pesquisas que analisam o comportamento do edifício com relação às mudanças climáticas, em especial partindo de dados regionais. Entre as pesquisas destaca-se a de Casagrande (2013), que fez um estudo abordando cenários de mudanças climáticas para a avaliação

de uma tipologia de edifício comercial em diferentes cidades, com o intuito de avaliar o desempenho térmico no clima futuro, considerando o impacto no consumo de energia. O estudo investigou a influência no desempenho futuro de variáveis como orientação, porcentagem de janelas nas fachadas e proteção solar. Em seu estudo, usou a simulação termoenergética com o software *Design Builder* e, para os arquivos de clima futuro, a ferramenta *CCWorldWeatherGen* com arquivos base em TRY e dados mundiais disponíveis no centro de dados do IPCC do cenário A2 do SRES considerando os climas de 2020, 2050 e 2080. Alves, Duarte e Gonçalves (2015b) concluíram um estudo sobre a resiliência das edificações às mudanças climáticas na cidade de São Paulo. Nele avaliaram o desempenho térmico de três unidades residenciais, tendo em vista as previsões diante das mudanças climáticas para a cidade de São Paulo, com dados locais e o cenário RCP 8.5 do AR5 do IPCC (ALVES; DUARTE; GONÇALVES, 2015a). As avaliações realizadas tiveram como foco a população idosa, consideraram casos reais e empregaram a simulação computacional por meio do programa *Thermal Analysis Software* (TAS). Foi analisado o conforto térmico por meio de horas de desconforto e graus-hora. Para o estudo, os autores usaram medições para os anos-base considerando o período de 1972 como um período passado, o de 2013 como um período presente e o de 2014 como um ano significativo com onda de calor. Os resultados mostraram uma tendência de incremento na sensação de calor em todos os cenários. A residência mais resiliente aos cenários de mudanças climáticas e ondas de calor possuía uma ótima condição de ventilação, menor carga interna e áreas com jardim no entorno, ao mesmo tempo que menor massa térmica e maior sombreamento por meio de recuos laterais em todos os lados. Os autores observaram um aumento muito significativo no desconforto por calor nos resultados com o clima que representava a onda de calor. Recentemente, o estudo de Invidiata e Ghisi (2016b) investigou o impacto que as mudanças climáticas teriam no conforto térmico dos usuários e na demanda para consumo energético de resfriamento e aquecimento em três cidades brasileiras numa habitação de interesse social. O estudo avaliou cinco medidas de adaptação. Os resultados mostraram aumento no consumo energético variando na ordem de 56% a 112% em 2050, sendo que as estratégias passivas poderiam reduzir até 50% desse consumo. O conforto do usuário foi calculado com base na metodologia de conforto adaptativo da ASHRAE 55. Observou-se que as horas de desconforto foram calculadas com base nas horas totais do ano, e não somente nas horas ocupadas, o que é mais usual na maioria das pesquisas. Os autores

utilizaram o cenário A2 do IPCC e assim como Casagrande (2013) obtiveram os arquivos futuros com o auxílio da ferramenta *CCWorldWeatherGen*. Contudo, de forma geral e até o presente momento, nenhuma das pesquisas observadas no Brasil aliou os estudos de impacto de mudanças climáticas com o ciclo de vida da edificação.

3.3 ABORDAGENS INTEGRADAS DO USO DA ENERGIA EM EDIFICAÇÕES CONSIDERANDO O CICLO DE VIDA

A parte final da revisão de literatura buscou pesquisas que tivessem uma abordagem integrada com o foco no uso da energia nas edificações e a integração com o ciclo de vida como conceito. Assim como Terés-Zubiaga et al. (2013) e Georgiadou, Hacking e Guthrie (2012), acredita-se que decisões importantes em relação ao desempenho energético dos edifícios devem ser testadas em longo prazo, desde o planejamento e etapas iniciais do projeto, considerando mudanças sociais, tecnológicas, econômicas e ambientais, de forma a ajudar na seleção de soluções apropriadas.

Abordagens conjuntas que incluem o conceito do ciclo de vida e variáveis de sustentabilidade visam métodos de avaliação mais globais para a redução do consumo energético e a melhoria do desempenho das edificações. Esse tema vem despertando interesse em pesquisas atuais, algumas focadas em materiais ou componentes construtivos da edificação e muitas delas em edifícios residenciais, devido às medidas governamentais que estão sendo exigidas nos governos e ao lançamento de normativas recentes.

Nessa linha, Kloepffer (2008) propôs a análise de sustentabilidade do ciclo de vida de um produto (*Life Cycle Sustainability Assessment - LCSA*). A parte ambiental deve ser analisada por meio da avaliação no ciclo de vida e a dimensão econômica pela metodologia de custos no ciclo de vida. Na questão social, deveria ser realizada a *Social Life Cycle Assessment* (SLCA), porém, no âmbito internacional, esta ainda carece de normativa. A avaliação social no ciclo de vida (SLCA) é uma metodologia que utiliza a estrutura da avaliação do ciclo de vida e toma como base a ISO 14040 e ISO 14044 com algumas adaptações. Usualmente aplicada a produtos, considera vários indicadores para sua avaliação, entre os quais, direitos humanos, condições dos trabalhadores, herança cultural, repercussão sócio-econômica e saúde e segurança, entre outros (UNEP e SETAC, 2011; CULTRI, SAAVEDRA e OMETTO, 2010). Várias pesquisas tem abordado o uso dessa metodologia,

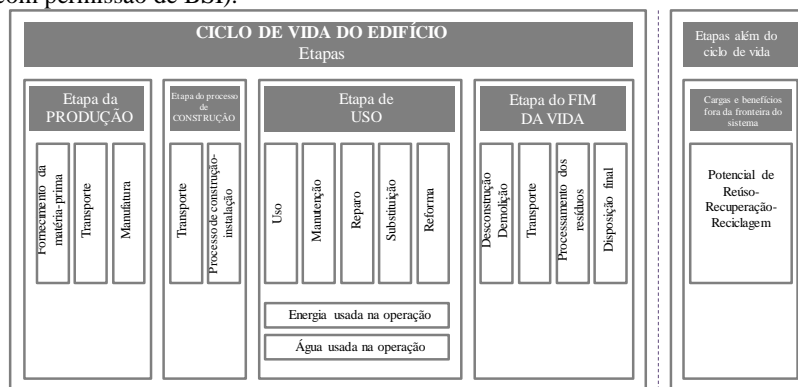
especialmente para produtos, quando se buscam avaliações de sustentabilidade de forma mais holística, e, integrada às avaliações ambiental e econômica no ciclo de vida. Entretanto, em pesquisas com foco no desempenho termoenergético do edifício relacionam-se aspectos sociais ligados a outros indicadores. A pesquisa de Georgiadou, Hacking e Guthrie (2012) relaciona nas questões sociais as mudanças nos padrões de trabalho e habitação e o conforto térmico, entre outros aspectos. De forma similar, Risholt, Time e Hestnes (2013) consideraram, nessa parte, aspectos como estética, qualidade do ar e conforto interno dos usuários. Para Kloepffer (2008), a LCSA depende de alguns pré-requisitos. As fronteiras dos sistemas das três avaliações devem ser consistentes e, de preferência, ser idênticas, sendo a melhor solução usar um único inventário do ciclo de vida para os três componentes; os métodos devem ter uma abordagem com base no ciclo de vida, evitando *trade-offs* e incluindo todo o ciclo de vida do berço ao túmulo; e evitar o deslocamento de problemas para o futuro é de especial importância na sustentabilidade.

Alinhados com essa consideração, Georgiadou, Hacking e Guthrie (2012) defenderam o conceito de *future-proofed buildings* e propuseram um marco conceitual para a análise do desempenho energético futuro dos edifícios, com base em três eixos: a) conceito do ciclo de vida, considerando a energia incorporada e a operacional, projeto para desconstrução e custo no ciclo de vida; b) inclusão de questões de sustentabilidade, com aspectos ambientais, econômicos e sociais; e c) abrangência de riscos e incertezas ao longo do tempo, que compreende considerar um projeto flexível e o uso de modelos com simulações de clima futuro. Os autores defendem que essa é uma área emergente que vem sendo estudada, porém ainda sem definições amplamente aceitas entre acadêmicos e profissionais da construção. Para eles, a longa vida útil das edificações, os impactos das mudanças climáticas e os requerimentos para um desenvolvimento de baixo carbono realçam a necessidade de um pensamento em longo prazo desde as primeiras etapas de projeto. Não obstante, seu trabalho ficou no âmbito do marco conceitual não mostrando uma forma de implementação.

Igualmente e de forma recente, têm sido lançadas normativas europeias que consideram esses princípios. O Comitê Técnico do CEN/TC 350 (*CEN's Technical Committee 350*) desenvolve o projeto "Sustentabilidade de trabalhos na construção" para o estabelecimento de métodos normativos horizontais para a avaliação do desempenho ambiental integrado de edifícios. Para ele, a avaliação de sustentabilidade deve quantificar impactos e aspectos do desempenho ambiental, social e

econômico do edifício com base na abordagem do ciclo de vida, por meio de indicadores. Com o projeto, pretende-se fornecer resultados com base comparativa e não níveis de desempenho ou *benchmarks*. As normas produzidas por esse comitê técnico estão sendo estruturadas em três níveis: nível conceitual ou *framework level*, do edifício e do produto, sendo aplicáveis tanto para edifícios novos quanto existentes (CEN, 2016). No âmbito ambiental do nível do edifício foi publicada em 2011 a EN 15978: Sustentabilidade nos trabalhos de construção – Avaliação do desempenho ambiental dos edifícios – Método de cálculo com base na ACV. A Figura 14 mostra as fases e a fronteira do sistema no ciclo de vida dos edifícios abordados pela norma.

Figura 14 – BS EM 15978:2011 Sustentabilidade de trabalhos da construção. Avaliação de desempenho ambiental de edifícios - Método de cálculo (adaptado com permissão de BSI).



Fonte: Baseada em RICS (2012).

Por outro lado, a EN16309: Sustentabilidade nos trabalhos de construção – Avaliação do desempenho social dos edifícios – Métodos, lançada em 2014, abordou o aspecto social. Para tanto, considerou medidas relacionadas aos ocupantes do edifício, com foco nos impactos da fase de uso. Foram usados indicadores nas categorias de acessibilidade, adaptabilidade, saúde, conforto dos usuários, impactos na vizinhança, segurança e manutenção, entre outros. E a EN16627: Sustentabilidade nos trabalhos de construção – Avaliação do desempenho econômico dos edifícios – Método de cálculo, foi lançada em maio de 2015 e aborda o aspecto econômico no edifício, indicando dois enfoques possíveis de serem usados: custo no ciclo de vida e balanço econômico no ciclo de vida (CEN, 2016).

Assim, observa-se que o desempenho integrado de edifícios está sendo visto como algo desejável para a avaliação do desempenho energético nas edificações. Do ponto de vista ambiental, recomenda-se o uso da metodologia de análise do ciclo de vida; do ponto de vista econômico, a análise de custo no ciclo de vida. Entretanto, a avaliação social carece, ainda, de consenso; todavia nota-se que tanto algumas pesquisas quanto as normativas europeias colocam o conforto do usuário dentro da dimensão social de sustentabilidade das edificações, quando o foco são aspectos do desempenho termoenergético do edifício.

Na linha de abordagens abrangentes de projetos, foi lançado na França o programa e sistema de gerenciamento de projetos Cub2D (CUB2D, 2015), que integra variáveis da sustentabilidade sendo elas: ACV, CCV, avaliação social qualitativa e riscos para a avaliação de projetos. Na avaliação social e de riscos são colocados pesos a critérios conforme a necessidade do usuário, sendo uma análise mais qualitativa. Igualmente, não integra simulação de energia e sua base de dados é europeia, não podendo no momento ser alterada.

Para Roulet et al. (2002), um procedimento usado para a avaliação de edificações deve permitir contabilizar a comparação de cenários, incluir a lista de critérios a serem considerados, quais os métodos para avaliação dos diferentes parâmetros e um método de classificação para a comparação dos parâmetros e das edificações avaliadas.

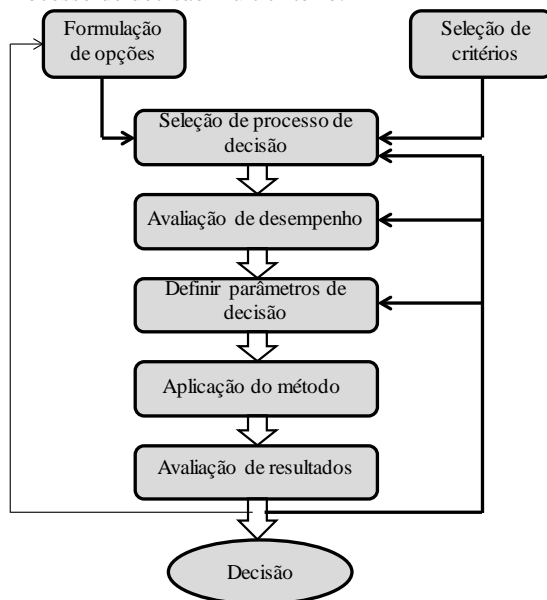
No caso da inclusão de múltiplas variáveis na avaliação, a seleção de indicadores é fundamental. Igualmente, apresentam-se problemas de decisão quando se conta com vários critérios que devem ser abordados de forma metodológica, o que tem sido tratado por muitas pesquisas por meio da análise multicritério. Conforme revisão de Pohekar e Ramachandran (2004), métodos de decisão multicritério têm estado presentes em questões relacionadas ao planejamento energético desde os anos 70, embora no começo com uma abordagem mais focada nas compensações entre demanda energética e custo. Isso mudou nos anos 80 para incorporar também aspectos sociais, ficando assim mais popular o uso de métodos de decisão multicritério. Para os autores esses métodos são muito importantes para a implementação em problemas reais.

Dentro da análise multicritério encontra-se a análise de decisão multicritério ou tomada de decisão multicritério, uma das suas formas de aplicação mais conhecidas (DETR, 2000). A análise de decisão multicritério,

“é tanto uma abordagem quanto um conjunto de técnicas, com o objetivo de prover uma ordenação global de opções, desde a mais preferida a menos preferida. As opções podem divergir no grau de alcançar diversos objetivos, e nenhuma opção será evidentemente melhor em alcançar todos. Adicionalmente, alguns conflitos ou compensações são usualmente evidentes entre os objetivos; por exemplo, opções que são mais benéficas são usualmente mais caras.” (DETR, 2000, p.47, tradução nossa).

A análise multicritério é importante para o entendimento das vantagens e desvantagens e a identificação de áreas em que seja possível realizar melhorias (DETR, 2000). O processo de decisão multicritério é apresentado na Figura 15, de acordo com Pohekar e Ramachandran (2004). Há muitos procedimentos para a análise multicritério e, segundo DETR (2000), entre os mais usados, encontram-se: a análise direta de uma matriz de desempenho, a teoria de utilidade multicritério (MAUT) e, em especial, o modelo linear aditivo, uma das abordagens de MCA mais utilizadas.

Figura 15 – Processo de decisão multicritério.



Fonte: (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

Conforme DETR (2000), os critérios escolhidos para a avaliação devem apresentar características com relação a: inclusão de todos os critérios importantes, critérios não redundantes, julgamento de cada opção em relação a cada critério, critérios independentes e número adequado de critérios para avaliar impactos no tempo. Sobre o número de critérios, em princípio podem ser usados diversos. Entretanto, Roulet et al. (2002) consideram que, no método proposto por eles, mais do que doze critérios de avaliação ficaria inviável. Além disso, a análise de sensibilidade e de incertezas se apresenta como algo muito relevante a se avaliar, em especial a última, quando considerados cenários futuros.

Com relação à avaliação de impactos no tempo, a metodologia da CCV engloba esse item por meio da taxa de desconto. Parâmetros similares poderiam ser aplicados à MCA, em que opções que devem acontecer antes podem ter maior peso, enquanto as que podem acontecer depois podem ter menor peso. Para isto é importante a definição do horizonte de tempo. Entretanto, não há consenso com relação a isso, pois alguns ambientalistas consideram que deva ser dado peso maior a impactos futuros.

A análise multicritério é comumente baseada em pesos, que indicam a ordem de desempenho das opções (DETR, 2000). Com relação aos pesos, alguns autores como Roulet et al. (2002) defendem o uso de pesos diferenciados para a avaliação dos critérios, enquanto outros defendem pesos iguais de avaliação. Para os autores, uma das desvantagens de manter pesos iguais para os critérios é de que muitas vezes permitem compensar baixo desempenho em um item com alto desempenho em outro, alegando que as decisões na vida real acabam sempre tendo um alto grau de subjetividade. Em muitas pesquisas, quando são propostos métodos com pesos, grande parte delas sugere que os pesos possam ser mudados conforme a necessidade e a avaliação individual. Por outro lado, por vezes são reunidos grupos de especialistas para opinar com relação aos pesos dos critérios. O uso de pesos iguais é defendido quando os critérios são considerados independentes. Igualmente, Mikučionienė, Martinaitis e Keras (2014) acreditam que, dada a complexidade do tema de sustentabilidade, todos os critérios deveriam ter peso igual. Para DETR (2000), podem ser atribuídos pesos aos cenários considerando sua possibilidade de ocorrência e, ainda mais, uma análise de sensibilidade pode ser considerada para o peso dos cenários.

Segundo DETR (2000) alguns métodos mostram formas de considerar os pesos usados para os modelos lineares aditivos, entre eles o *Analytical Hierarchy Process* (AHP), em que os pesos e a pontuação das alternativas se baseiam na comparação de pares entre critérios e opções, sendo avaliada a importância de um critério em relação a outro para a decisão a ser tomada. Segundo Munier (2004), isso mostra uma série de opções que são priorizadas no lugar de uma única. Por outro lado, o *Outranking Method*, desenvolvido na França, busca eliminar alternativas que são consideradas “dominadas”, considerando que uma opção supera outra quando o desempenho é superior em critérios suficientes e de igual importância e não é superada pela outra opção, levando-se em conta um desempenho muito inferior em algum critério. Além disso, métodos com base em conjuntos *fuzzy* ainda não são aplicados amplamente. Os autores consideram a imprecisão inerente a alguns dados tendem a capturar a ideia de que, por vezes, os critérios não são vistos como algo preciso, usando a ideia de “função de associação” em que as opções podem pertencer, por exemplo, a uma opção “atraente” com certo grau de filiação que pode ser considerado de 0 a 1.

Conforme Pohekar e Ramachandran (2004), podem ser colocados como métodos de MCDM, além dos anteriores, o Método da soma dos pesos (WSM); o Método do produto dos pesos (WPM); o *Preference*

ranking organization method for enrichment evaluation (PROMETHEE); o *Elimination and choice translating reality* (ELECTRE); o *Technique for order preference by similarity to ideal solutions* (TOPSIS); e o *Compromise programming* (CP). Entre eles, destaca-se o WSM, considerado pelos autores como o mais usado, o qual considera M alternativas e N critérios com os seus pesos. O valor final da alternativa é dado pela soma em todos os critérios. O problema do método é ser aplicado com critérios que têm diferentes unidades, para o qual muitas pesquisas usam a normalização de dados. A seleção do método mais apropriado para a análise multicritério depende de vários fatores, entre eles a relação de dependência dos critérios.

A análise multicritério é um tema muito abrangente de estudo, presente em muitas áreas. Entretanto, algumas pesquisas internacionais têm abordado a análise multicritério como forma de avaliação para considerar vários parâmetros com relação à sustentabilidade das edificações ou dos componentes, sendo algumas focadas no uso da energia da edificação e na incorporação de estratégias de eficiência energética. Outras pesquisas abordam métodos de análise multicritério focados na otimização. A maioria das pesquisas observadas propõe a integração de parâmetros ambientais ou energéticos junto a econômicos (ANASTASELOS et al., 2009; IBN-MOHAMMED et al., 2014; SILVESTRE et al., 2013) e, por vezes, de forma ainda não muito frequente a algum critério social (RISHOLT et al., 2013), sendo um tema bastante recorrente na revisão de literatura a renovação de edificações considerando critérios de energia e ciclo de vida por meio de análise multicritério.

Ferreira, Pinheiro e Brito (2013) fizeram um levantamento de pesquisas que tratam desse assunto. Pohekar e Ramachandran (2004) revisaram mais de 90 artigos que discutem a aplicação de métodos multicritério para planejamento energético sustentável. O tema incluía edificação, mas não se limitou somente a esse, sendo mais amplo e integrando outros temas da área. Na sua revisão os autores observaram que o *Analytical Hierarchy Process* (AHP) era a técnica mais usada na amostra, seguidas das técnicas PROMETHEE e ELECTRE. Foram observados também a validação dos resultados com diversos métodos, o desenvolvimento de ferramentas de apoio e a aplicação de métodos *fuzzy* para abordar incertezas.

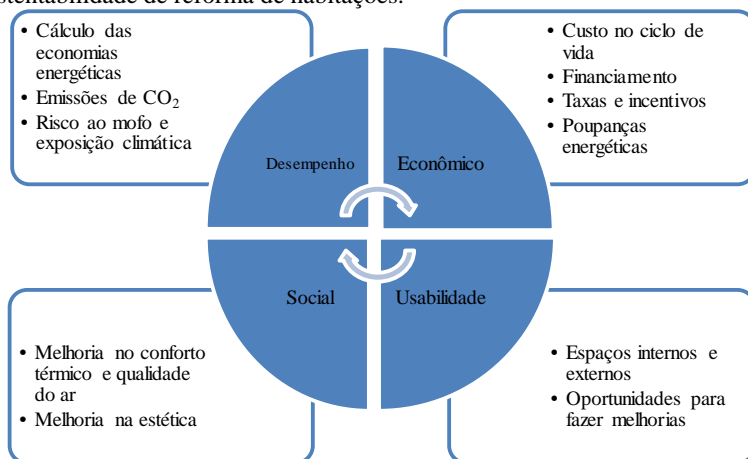
Pesquisas como a de Mikučionienė et al. (2014) consideraram a inclusão de medidas de eficiência energética com base em critérios de sustentabilidade. Para os autores, quando se busca uma avaliação

sustentável de medidas de eficiência energética, os critérios de avaliação devem ser decididos primeiro; sendo geralmente usados mais de um critério, com a definição dos critérios em função do objetivo da análise. Para eles, uma avaliação sustentável de medidas de eficiência energética só é possível por meio de análise multicritério, devendo ser avaliados tanto fatores quantitativos quanto qualitativos.

Nesse sentido, a pesquisa de Risholt, Time e Hestnes (2013) propôs uma avaliação de sustentabilidade para a reforma de habitações com consumo quase zero de energia, com base em diversos indicadores quantitativos e qualitativos. Para isso, os autores usaram como estudo de caso uma casa unifamiliar, levando em conta a avaliação de dois cenários de reforma. Eles defenderam o uso de métodos de análise de sustentabilidade multicritério e consideraram que os indicadores de sustentabilidade devem ser escolhidos conforme o objetivo do projeto devendo incluir as necessidades do usuário. Para os autores, a norma europeia EN15643-1 que fala sobre avaliação de sustentabilidade de edifícios, embora defina um marco conceitual para a abordagem integrada e possíveis indicadores para a avaliação da sustentabilidade, não dá um método para como executar a avaliação em si e como analisar possíveis conflitos entre indicadores, por exemplo, de desempenho e econômico. Devido a isso, os autores tomaram como base para a sua pesquisa o método de avaliação para renovações de edifícios residenciais publicado pelo Instituto Britânico de Sustentabilidade. No método, os indicadores de sustentabilidade são divididos nas categorias econômica, desempenho, social e impactos da usabilidade, cujas análises dos impactos podem ser qualitativas ou quantitativas, dependendo do indicador. Os impactos sociais e de usabilidade foram relacionados com a qualidade da habitação conforto térmico e as preferências do usuário. O desempenho incluiu economias energéticas e ambientais, assim como melhoria do desempenho técnico. O foco do estudo foi a análise de estratégias de reforma, e não a escolha ótima de produtos, por isso os autores justificam a não inclusão da análise de energia incorporada, nem de emissões de CO₂ no estudo, focando-se na energia operacional, embora se acredite que deveria ser incluída no estudo. A categoria econômica incluiu a análise do custo no ciclo de vida, calculada conforme a norma EN 15459. Dados da inflação e taxa de interesse real foram tomados tendo o embasamento de dados nacionais, sendo apenas incluídos custos relacionados com eficiência energética. Os custos das medidas implantadas foram tomados com base nos fabricantes e fornecedores. Nos indicadores de usabilidade os autores consideraram a possibilidade de melhorias na casa, que

acompanhem mudanças na vida, ou seja, flexibilidade (Figura 16). As preferências dos usuários basearam-se em estudos nacionais anteriores e entrevistas com proprietários.

Figura 16 – Método interativo com categorias de impacto para avaliação de sustentabilidade de reforma de habitações.



Fonte: Risholt, Time e Hestnes (2013).

Os dois cenários considerados para a análise foram chamados de “fachada”, que incluiu novas janelas, isolamento nas paredes externas e redução da infiltração; e “ambicioso”, que incluiu uma reforma total na envoltória com estratégias de *passive house*. Os resultados foram analisados pelas categorias. Em relação ao desempenho energético, foi verificado o consumo, tendo ambos os cenários alcançado níveis de consumo de energia quase zero, com reduções para aquecimento entre 50% e 85%. Outros indicadores de desempenho foram analisados em relação ao tipo de usuário com avaliações mais qualitativas. Na análise de CCV as estratégias do cenário “fachada” tiveram um custo menor ao longo da vida da edificação considerada em dez anos. Contudo, se observada uma mudança no custo da energia valeria a pena o outro cenário. Em relação à usabilidade, ambos os cenários tiveram comportamentos parecidos. Na categoria social, as questões estéticas dependiam do usuário. Para o conforto interno, os autores assumiram que o cenário ambicioso seria melhor pelas características térmicas dos componentes da envoltória; porém, não foram observados dados que comprovem essa afirmação como a realização de simulações. O estudo

mostrou a incorporação de critérios qualitativos e quantitativos em várias categorias, contudo não mostrou um método mais preciso de decisão final.

Por outro lado, embora a proposta desenvolvida por Silvestre, Brito e Pinheiro (2013) seja um método de avaliação de alternativas de montagem de paredes, relacionado ao desempenho térmico de edifícios, considera-se importante por incluir aspectos ambientais, energéticos e econômicos do berço ao berço, ou seja, considerando a introdução, novamente, do material no ciclo de vida. O método chamado de *Environmental, energy and economic life cycle from cradle to cradle* (3E–C2C) tomou como base as normas desenvolvidas pelo CEN/TC 350, incluindo todas as etapas do ciclo de vida. Os autores propuseram um método que ajudasse os projetistas na escolha de alternativas de projeto e, especificamente, de componentes de paredes com desempenho térmico similar, permitindo a comparação de opções que não precisassem ser funcionalmente equivalentes e a quantificação de diferentes aspectos de desempenho, considerando cada fase do ciclo de vida. Para isso, foi proposta uma avaliação integrada. Para o desempenho ambiental, foi usada a metodologia de ACV, seguindo também os princípios das normas EN 15643–2:2010 e EN 15978:2011. A abordagem econômica usou a análise de custo no ciclo de vida, considerando a maioria dos princípios da EN 15643–4:2012 com o método do valor presente líquido. O VPL de cada alternativa foi calculado para o período estudado, assumindo valores constantes. O desempenho energético foi considerado pelo consumo de energia para aquecimento e refrigeração. Os autores defendem a não inclusão das questões socioculturais na proposta, por não se ter um acordo ainda nessa área. Pelo método proposto, todos os resultados das categorias de impacto da ACV foram convertidos em uma unidade econômica para permitir serem somados aos resultados da CCV, obtendo-se um único resultado global. Para tanto, os autores tomaram como base um dos métodos de avaliação de impacto usados na ACV, o *Eco-costs 2007*, cuja unidade é o Euro. Dessa forma, a metodologia propõe que, para cada alternativa, seja considerado o *3E cost–C2C* como a soma do custo ambiental, econômico e energético. Como aplicação da metodologia proposta por Silvestre, Brito e Pinheiro (2013) foram avaliadas diferentes alternativas de parede para um prédio multifamiliar de seis andares, em Portugal, considerado uma tipologia recorrente no local. Para o cálculo da fase de produção do material foi usado o programa *SimaPro*, aplicando, principalmente, a base de dados do programa *Ecoinvent* e fazendo adaptações à realidade portuguesa quando necessário, em

especial com relação à matriz energética. Na etapa de construção do edifício os autores só consideraram o impacto do transporte, pois perceberam que, para as outras etapas, faltavam informações e não tinham um peso significativo. Na fase de uso e para a manutenção dos materiais foi estimada a vida de serviço de cada material com base na ISO 15686-1-2-7 e 8 e considerados, unicamente, os consumos com relação a aquecimento e resfriamento para todas as análises, com base em dados nacionais. Para o final da vida útil, foi assumido o cenário de demolição seletiva, conduzindo alguns materiais para aterro e outros para reciclagem. Todas as etapas foram consideradas para o cálculo econômico, obtendo os custos dos materiais com fornecedores. Os autores testaram mudanças, alterando em mais ou menos 2% o valor da taxa de desconto, mas não encontraram diferenças significativas; mas com 5%, encontraram para uma das alternativas. Os resultados da avaliação de desempenho nas três categorias e para as diferentes alternativas de componente foram analisados conforme seis categorias do *eco-costs*. Os autores defendem o uso de abordagens integradas para não tomarem decisões que podem ser equivocadas, quando se tem como base para avaliação, apenas um ou dois aspectos. O método proposto pelos autores mostra uma abordagem mais completa para a avaliação do desempenho térmico do edifício, entretanto, centra-se, unicamente, na escolha de um componente.

Seguindo com uma linha similar aos autores anteriores, Anastaselos, Giama e Papadopoulos (2009) propuseram uma ferramenta para a avaliação de soluções de isolamento térmico que integra uma avaliação energética, econômica e ambiental, cujo objetivo é dar aos projetistas resultados que permitam a avaliação de diversas alternativas de melhoria nos projetos. Para o desenvolvimento da ferramenta, tomaram como base a metodologia da ACV. Para isso, foi desenvolvida uma base de dados com os principais materiais de construção na Grécia, considerando as suas propriedades térmicas (densidade, condutividade térmica, calor específico), emissões (de produção, transporte e instalação em relação a CO₂eq, SO₂eq, PO₄eq, C₂H₄eq), impactos ambientais (mudanças climáticas, acidificação, *eutrophication*, e *photochemical oxidation*), energia incorporada e custos. Para os dados de materiais, foi usado o *SimaPro* com a base de dados da *Ecoinvent*, sendo empregados dois métodos de avaliação: CML 2 baseline 2000 e Eco Indicator 95. A avaliação foi proposta em três níveis, considerando a análise ambiental, energética e econômica. Por conta disso, foram selecionadas diferentes unidades funcionais, conforme o nível de avaliação. Contudo, na análise

econômica, o custo não foi dado como custo no ciclo de vida, senão como custo de mercado de um ano específico do levantamento dos dados. Os critérios foram avaliados com *ranking* A, B e C, que correspondem aos intervalos entre grupos, conforme aplicação no edifício, de forma que, dentro de cada grupo, os resultados da avaliação ambiental, energética e econômica fossem comparados para identificar o maior e o menor valor. Depois desse intervalo, os resultados foram divididos em três áreas que correspondiam aos *rankings* A, B ou C. A representou o menor impacto ou bom desempenho; B, o impacto maior e C, o impacto maior ainda. O consumo operacional foi avaliado com o uso do programa TRNSYS. Igualmente à pesquisa anterior, a avaliação foi realizada tendo como foco a avaliação de um componente.

Por fim, a Tabela 7 relaciona algumas pesquisas, além das citadas anteriormente, que adotaram análise multicritério para a avaliação do uso da energia na edificação ou componentes considerando o ciclo de vida, mostrando objetivo, método, fase da edificação que aborda (Pré-uso, Uso, Pós-uso) e critérios avaliados (Energia, Ambiental, Econômico, Social e Outros).

Tabela 7 – Pesquisas que adotam abordagens integradas para avaliação do uso da energia no edifício ou componentes do edifício.

Autor Ano	Objetivo Método	Avaliação		Fase			Critérios					
		Edifício	Componente	Pré-uso	Uso	Pós-uso	Energético	Ambiental	Econômico	Social	Outros	
Islam et al. (2015)	Avaliação de casas típicas na Austrália com alternativas de coberturas com forro e pisos considerando ACV e CCV. Indicadores de impacto: emissões de GEE, demanda de energia acumulada, uso da água e geração de resíduos. Valores normalizados.	X		X	X	X		X	X			

Tabela 7 - (continuação).

Autor Ano	Objetivo Método	Avaliação		Fase			Critérios				
		Edifício	Componente	Pré-uso	Uso	Pós-uso	Energético	Ambiental	Econômico	Social	Outros
Whitehead et al. (2014)	Sugeriu um modelo por meio de um marco de avaliação de desempenho com base na avaliação de impacto ambiental. A avaliação podia ser ambiental, econômica, de saúde e conforto.	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Gervásio et al. (2014)	Abordagem para avaliação simplificada de edifícios nas fases iniciais do projeto considerando impactos ambientais por meio de macro – componentes e uso de energia operacional.		X	X	X		X	X			
Vučević et al. (2014)	Avaliaram a sustentabilidade do uso de energia em edifícios residenciais. Propuseram um índice de sustentabilidade para edifícios residenciais com base no consumo de energia final.. Avaliaram diferentes tipologias.	X			X		X	X	X	X	
Yao (2014)	Análise do ciclo de vida com múltiplos objetivos para o desenho de edifícios. Considerou critérios de energia (incorporada e operacional), ambiental (emissões de CO ₂) e econômico (CCV).	X		X	X		X	X	X		

Tabela 7 (continuação)

Autor Ano	Objetivo Método	Avaliação		Fase			Critérios				
		Edifício	Componente	Pré-uso	Uso	Pós-uso	Energético	Ambiental	Econômico	Social	Outros
Mikučionienė et al. (2014)	Análise multicritério e otimização para a renovação de edifícios. Método para pacotes de medidas de eficiência energética utilizando o método da árvore de decisão. Critérios de eficiência energética, impacto ambiental, econômico, conforto e duração ao longo do ciclo de vida com valores normalizados.	X			X		X	X	X	X	X
Akadiri, Olomolaiye e Chinyio (2013)	Modelo para a seleção de materiais sustentáveis, considerando critérios de avaliação com a abordagem nas três vertentes da sustentabilidade. Pesos para os critérios. Pesquisa a especialistas.		X	X	X	X		X	X	X	X
Risholt, Time e Hestnes (2013)	Usaram indicadores de energia, custo no ciclo de vida e qualidade da habitação como parâmetros de sustentabilidade para renovações de edifícios.	X			X		X	X	X	X	

Tabela 7 (continuação)

Autor Ano	Objetivo Método	Avaliação		Fase			Critérios				
		Edifício	Componente	Pré-uso	Uso	Pós-uso	Energético	Ambiental	Econômico	Social	Outros
Villarinho Rosa e Haddad (2013)	Método para avaliar a sustentabilidade de edifícios existentes no Rio de Janeiro, Brasil. Trabalharam com critérios e subcritérios e famílias de indicadores com o seu respectivo nível de importância.	X			X		X	X	X	X	
Silvestre, Brito e Pinheiro (2013)	Propuseram o método (3E-C2C) de avaliação de alternativas de montagem de paredes relacionado ao desempenho térmico dos edifícios. O método incluiu aspectos do berço ao berço.		X	X	X	X	X	X	X		
Wang, Chang e Nunn (2010)	Abordagem de ciclo de vida para a avaliação do projeto de edifícios considerando benefícios ambientais e econômicos. Usou avaliação do ciclo de vida, incluindo custo no ciclo de vida, tomada de decisão multicritério e métodos para decisão de grupo.	X		X	X	X	X	X	X		
Anastaseos, Giama e Papadopoulou (2009)	Ferramenta para a avaliação de soluções de isolamento térmico que integrou avaliação energética, econômica e ambiental.		X	X			X	X	X		

Tabela 7 (continuação)

Autor Ano	Objetivo Método	Avaliação		Fase			Critérios					
		Edifício	Componente	Pré-uso	Uso	Pós-uso	Energético	Ambiental	Econômico	Social	Outros	
San-José et al. (2007)	Analisaram requisitos de sustentabilidade ambiental para um edifício industrial, por meio da definição de indicadores. Produziram um "índice de sustentabilidade ambiental" para avaliação. Usaram o método AHP para assinar pesos aos critérios.	X		X	X	X	X	X				
Roulet et al. (2002)	Metodologia de avaliação multicritério para edifícios de escritórios e cenários de <i>retrofit</i> de considerando consumo de energia operacional, emissões, qualidade do ar interno (conforto térmico, ruído) e custo. O melhor edifício alcança o melhor desempenho em todos os critérios de forma equilibra.	X			X		X	X	X	X		
Balcomb e Curtner (2000)	Análise multicritério como ferramenta para tomada de decisão nas fases iniciais de projeto. Foram seis critérios principais avaliados tanto qualitativos quanto quantitativos. Resultados mostrados de forma gráfica diante de um edifício de referência.	X		X	X		X	X	X	X	X	X

Fonte: Elaboração da autora.

Nas pesquisas levantadas na Tabela 7 a maioria foi destinada à avaliação do edifício de forma integral, considerando principalmente a fase de uso, seguida da fase de pré-uso. Entretanto, muitas pesquisas focaram o estudo no desenvolvimento da metodologia de decisão multicritério, enquanto em outras essa metodologia foi empregada para a visualização final de resultados, dando mais relevância aos indicadores propostos. Aspectos relevantes são observados nas pesquisas elencadas nesse item em relação aos critérios, aos indicadores abordados e ao método de avaliação de análise multicritério.

Com relação aos critérios e indicadores abordados, pode ser observado, que quando são usadas variáveis integradas para a avaliação das estratégias de eficiência energética em componentes ou edificações, geralmente são apresentadas a avaliação ambiental e a energética com ACV ou ACVE, e a econômica com CCV, com poucas pesquisas abordando critérios sociais ou outros. Quando considerada a avaliação social, são levantados por vezes, alguns critérios qualitativos e também de conforto em algumas pesquisas. Observa-se também que a questão das mudanças climáticas, em conjunto com análises de ciclo de vida integrada, geralmente não é abordada. E considera-se importante a abordagem desse tema nesse tipo de análise, pois pode ter um impacto grande no desempenho da edificação e nas estratégias de eficiência energética propostas, considerando o desempenho no ciclo de vida.

Sobre os métodos de análise multicritério abordados, observa-se um grande uso de análises lineares sendo muitas delas sem avaliação final por pesos. Por outro lado, a normalização é uma etapa observada em algumas das pesquisas levantadas. A normalização permite a soma de critérios com diversas unidades (VUČIČEVIĆ et al., 2014) enquanto autores como Roulet et al. (2002) normalizam os resultados em função da área construída para permitir a comparação de edificações com diversos tamanhos. Nesse sentido, em algumas pesquisas observou-se a criação de índices de sustentabilidade (SAN-JOSÉ et al., 2007) para comparar edificações. Para Yao (2014), os índices são apresentados para cada avaliação, no seu caso avaliações energética, econômica e ambiental. Quando do uso de pesos, observou-se o uso frequente do AHP para a escolha dos pesos nos critérios. Somente umas das pesquisas localiza-se no Brasil e abordou somente a fase de uso para edifícios existentes no Rio de Janeiro (VILLARINHO ROSA; HADDAD, 2013). Entretanto, a sua avaliação foi mais global na linha de metodologias de certificação, porém incluindo aspectos econômicos e sociais. Essa sua pesquisa foi centrada

no desenvolvimento da metodologia multicritério, e não na forma de avaliação dos indicadores.

3.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram buscados os subsídios necessários para o estabelecimento do marco conceitual e da metodologia proposta da pesquisa. Foram discutidos com mais detalhe os temas que compõem este estudo, abordando definições, procedimentos metodológicos, problemáticas e pesquisas relevantes na área, com vistas a definir o estado da arte sobre a incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos de habitações de interesse social a partir de abordagens mais holísticas que integrem conceitos de sustentabilidade, ciclo de vida e mudanças climáticas. Na questão ambiental observou-se a análise do ciclo de vida como a metodologia mais aplicada. Nesse sentido, muito autores concordam que analisar unicamente os aspectos que estão relacionados ao consumo de energia (ACVE), pode ser válido para o estudo de ACV em edificações, visto que deixa a ferramenta mais aplicável. Também vários autores defendem o uso da simulação termoenergética para a fase de operação como algo desejável para uma avaliação mais completa, a partir do ponto de vista da sustentabilidade. Por outro lado, a maioria das pesquisas levantadas concorda na avaliação de alguns materiais principais que, no geral, se referem à envoltória da edificação. Com relação às etapas nas fases de análise, há muitas divergências. Porém, há consenso de que as fases mínimas de análise são três: pré-uso, uso e pós-uso. Contudo, a fase de pós-uso foi abordada de forma simplificada em algumas pesquisas. A unidade funcional é de extrema importância para o estudo da análise do ciclo de vida energética (ACVE), sendo definida por vários autores como a construção e a ocupação de uma casa, considerando a vida útil e o atendimento a uma família, enquanto outros usam também a área da casa e o número de habitantes. Com relação ao impacto que deve ser estudado, a categoria de mudanças climáticas e principalmente, as emissões de CO₂, assim como o consumo energético, aparecem como um indicador de consenso geral.

Com relação à energia operacional, o setor residencial brasileiro apresenta dados de usos finais de consumo de energia operacional muito divergentes, em especial para o uso do ar-condicionado. Entretanto, a maioria das pesquisas concorda na preponderância do condicionamento ambiental na fase de uso diante das outras cargas internas, tanto no cenário climático atual, quanto no futuro, pelo potencial aumento do

consumo do ar-condicionado com o enfoque nas mudanças climáticas e especificamente nas questões relacionadas ao aquecimento global. Sobre esse tema, muitas pesquisas apontam que as mudanças climáticas, além de serem consideradas impacto, são também uma variável que influencia no desempenho futuro das edificações, o que na maioria dos projetos para edificações na atualidade brasileira ainda não é levado em consideração. Nesse sentido, há muitas pesquisas internacionais com relação ao tema de adaptação às mudanças climáticas, mas muito poucas no Brasil, em especial na área de habitações de interesse social. Por outro lado, em muitos países é possível a obtenção de dados regionais das previsões de variação do clima antecipadas pelo IPCC. No Brasil, muito recentemente começam a aparecer alguns dados mais locais com relação a esse tema. Todavia, há consenso no uso da metodologia *morphing*, porém ainda se têm posições diferentes com relação à obtenção dos arquivos climáticos futuros, quando não se têm dados oficiais regionais disponíveis, assim como do cenário ou dos cenários ideais escolhidos para análise.

Para a avaliação econômica de estratégias para edificações, levando em conta o ciclo de vida, recomenda-se amplamente o custo no ciclo de vida como a metodologia mais adequada; contudo, há divergências em relação a tempos de estudo, e várias pesquisas internacionais estão abordando o estudo de avaliação ambiental e econômica no ciclo de vida. A metodologia de avaliação social no ciclo de vida é abordada por pesquisas mais ligadas à produtos e considera diversos indicadores. Entretanto, muitas pesquisas relacionadas ao ciclo de vida e desempenho termoenergético dos edifícios raramente abordam critérios sociais, e entre as que abordam não há um consenso com relação aos indicadores. Contudo, observou-se que algumas dessas pesquisas colocam o conforto térmico ligado ao bem-estar do usuário com um dos possíveis indicadores dentre os aspectos sociais. Pesquisas que abordam conforto térmico, geralmente usam a metodologia do conforto adaptativo da ASHRAE 55, sendo a avaliação para edificações naturalmente ventiladas. Algumas pesquisas usam graus-hora como indicador de desempenho relacionado ao conforto térmico do usuário, o qual se mostra mais empregado em pesquisas com simulação termoenergética.

Finalmente, a revisão de literatura mostrou uma crescente e recente preocupação em pesquisas internacionais que incluem abordagens conjuntas no uso de energia em edificações, com parâmetros ambientais, econômicos e por vezes sociais, levando em conta o conceito de ciclo de vida. E observou-se que grande parte delas faz uso da metodologia de análise multicritério. O estudo dessa metodologia é abrangente; contudo,

algumas pesquisas fizeram uso dela de forma simplificada para a análise final dos resultados avaliados.

Observou-se uma tendência, principalmente nas pesquisas europeias, por métodos de avaliação mais abrangentes. Contudo as bases ainda não estão muito consolidadas para a sua real forma de aplicação. E as pesquisas observadas de abordagens multicritério não relacionam mudanças climáticas na sua avaliação. Por fim, não foram observadas pesquisas que tenham o mesmo enfoque proposto e, em especial, no Brasil até o momento.

4. MATERIAIS E MÉTODO

A revisão da literatura permitiu a elaboração do método proposto para esta pesquisa, o qual tem como objeto de estudo projetos de habitações de interesse social, parcela considerada muito importante no desenvolvimento presente e futuro do país. O método proposto toma como base o conceito do ciclo de vida e de sustentabilidade nas edificações, assim como as mudanças climáticas com foco no aquecimento global, por meio de uma abordagem integrada que relaciona estes conceitos ao desempenho termoenergético do edifício, tendo seu desenvolvimento compreendido as seguintes etapas:

1. Elaboração de projetos de edificações representativas de habitações de interesse social do PMCMV e análise de desempenho termoenergético atual;
2. Avaliação na fase de uso da edificação da influência das mudanças climáticas no comportamento termoenergético futuro e com medidas de adaptação; e
3. Avaliação da incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos de habitações de interesse social no Brasil por meio de abordagem integrada no ciclo de vida considerando mudanças climáticas com foco no desempenho termoenergético do edifício.

A Figura 17 mostra as três etapas propostas na pesquisa com os principais aspectos contemplados em cada etapa.

A realização de cada etapa permitiu avançar para a etapa seguinte. Dessa forma, e devido aos resultados das etapas estarem atrelados ao desenvolvimento da etapa subsequente, optou-se por apresentar cada uma delas de forma independente, isto é, com seu método proposto e resultados alcançados. Contudo, apresenta-se aqui, uma breve introdução a todas as etapas propostas para a pesquisa, buscando maior compreensão do método proposto, enquanto, nos capítulos subsequentes, mostram-se o método e os resultados de cada uma das etapas seguintes. A Figura 18 mostra o método proposto para a pesquisa em maior detalhe diferenciando cada uma das etapas por cores e mostrando a relação entre as mesmas.

Figura 17 – Principais etapas do método.

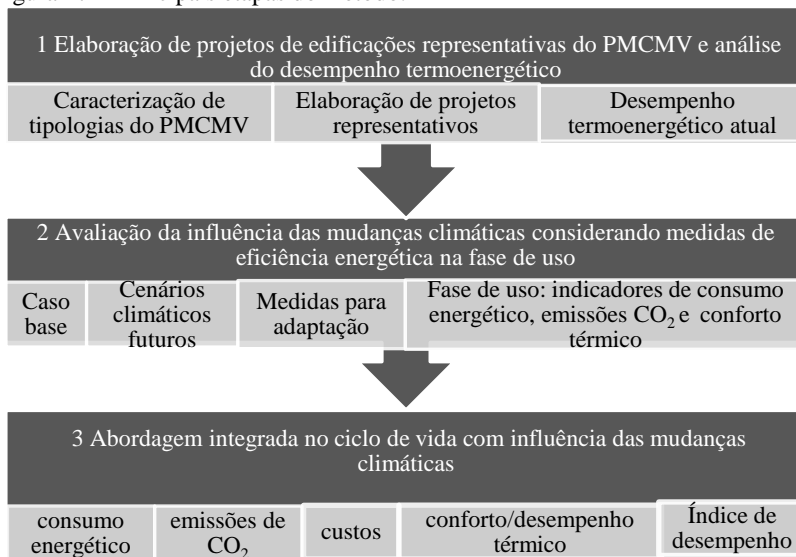
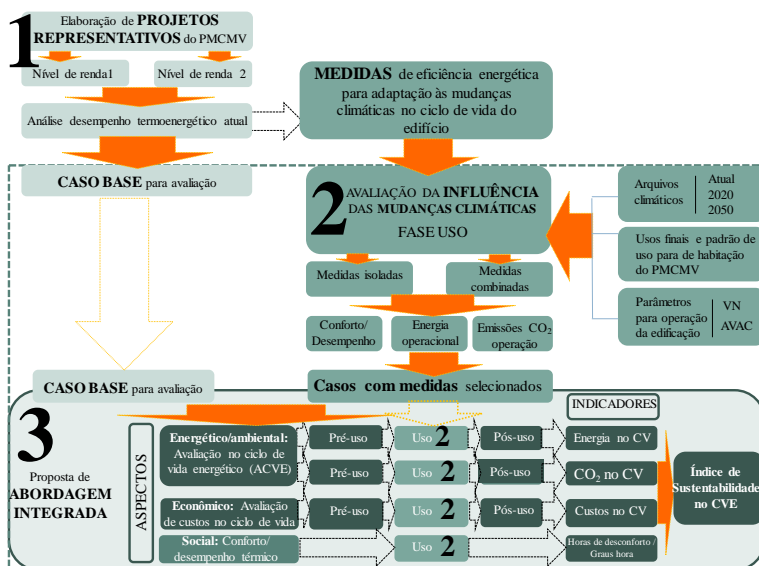


Figura 18 – Maiores detalhes do método proposto para a pesquisa.



Notas: CV = Ciclo de vida; CVE = Ciclo de vida energético

Na etapa 1, foi buscada a elaboração de projetos de edificações representativas do PMCMV com o objetivo de identificar as principais tipologias que estão sendo construídas dentro do Programa e construir um panorama atual com relação ao desempenho termoenergético das edificações do setor, como fundamento para a pesquisa. Para isso, foram considerados tanto projetos que estão sendo construídos por companhias de habitação e agentes públicos quanto por construtoras atuantes no Programa, usando abordagens diferenciadas por faixa de renda, considerando uma subdivisão em dois níveis de renda. Nos projetos representativos foram realizadas avaliações de desempenho termoenergético com relação às referências nacionais para estimativa do desempenho atual do estoque que está sendo construído. As análises foram realizadas em duas zonas bioclimáticas, tendo a escolha das zonas considerado as capitais dos estados que apresentaram o maior déficit habitacional no país, zona 3, representada por São Paulo capital; e zona 8, representada pela cidade de Salvador no estado da Bahia, além de as duas cidades representarem climas diferenciados no país. A tipologia considerada como sendo ainda a mais produzida no país foi escolhida para a realização das etapas seguintes e constitui o caso base.

Na etapa 2, foi realizada a avaliação da influência das mudanças climáticas tanto na edificação considerada como caso base quanto considerando a incorporação de medidas selecionadas para adaptação em termos de eficiência energética na fase de uso da edificação. Nesta pesquisa a abordagem frente às mudanças climáticas foi em relação às variáveis que foram alteradas nos arquivos climáticos futuros, sendo principalmente, temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e ventos. Ou seja, variáveis relacionadas ao aquecimento global que influência no desempenho termoenergético do edifício. Desta forma, sempre que refere-se à mudanças climáticas é somente sob este enfoque. Nesta etapa foi possível a análise de diversas medidas avaliadas de forma isolada e em conjunto por meio de simulação termoenergética. Foram modelados arquivos de clima futuro das cidades em análise para o horizonte de tempo correspondente à vida útil da edificação. Os indicadores propostos para a fase de uso consideraram o consumo na operação; as emissões de CO₂; e o conforto térmico do usuário aliado ao desempenho térmico da edificação.

Por último, na etapa 3, propôs-se a elaboração de uma abordagem integrada para avaliação da incorporação de medidas de eficiência energética no projeto representativo, escolhido de forma a incluir os conceitos de ciclo de vida e adaptação às mudanças climáticas assim

como aspectos do tripé da sustentabilidade. O foco foi limitado ao uso da energia dentro da edificação, partindo-se da condição atual dos projetos em contraste com as melhorias alcançadas com a incorporação das medidas de adaptação. A avaliação considerou, de forma comparativa, estudos de casos em número mais restrito e incluiu resultados da fase de uso da etapa anterior. Foram contabilizadas as entradas e as saídas em busca de um balanço adequado de sustentabilidade para as decisões tomadas, observando o tempo de vida útil da edificação. A análise do ciclo de vida energético junto à simulação computacional foi proposta para a avaliação ambiental e energética, considerando os indicadores de consumo energético e emissão de CO₂ tanto incorporado quanto operacional. O conforto do usuário relacionado ao desempenho da edificação avaliado na fase de uso foi proposto como indicador vinculado ao bem-estar do usuário, e portanto, de certa forma, ao aspecto social, por levar em consideração a edificação naturalmente ventilada. Para a avaliação econômica, foi aplicada a metodologia de análise de custos no ciclo de vida, utilizando o modelo do valor presente líquido. O indicador dessa avaliação foi o custo no ciclo de vida. Finalmente, foi realizada uma abordagem integrada com os indicadores propostos buscando obter um índice de desempenho, com o objetivo de visualizar as estratégias que apresentaram melhor comportamento em relação aos diversos parâmetros, considerando o ciclo de vida da edificação e as mudanças climáticas.

A pesquisa e o método foram propostos de forma a incorporar abordagens mais integradas no uso da energia das edificações que são propostas no setor de habitações de interesse social. Os próximos capítulos são colocados de forma a mostrar os materiais e o método utilizado em cada uma das etapas e os resultados alcançados.

5. ELABORAÇÃO DE PROJETOS REPRESENTATIVOS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL E ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO

A continuação colocam-se os materiais e método da primeira etapa da pesquisa e posteriormente os resultados, discussão dos resultados e considerações finais dessa etapa.

5.1 MATERIAIS E MÉTODO

A primeira etapa da pesquisa realizou a elaboração de projetos de edificações representativas que estão sendo aprovados no PMCMV para habitações urbanas e estimou o seu desempenho termoenergético atual com relação à Etiqueta de Energia. A representação da realidade nacional com relação à produção de novas habitações de interesse social, cumpriu dois objetivos: primeiro proporcionar o caso base a ser utilizado nas outras etapas desta pesquisa; e segundo servir de base para pesquisas futuras que abordem estudos sobre o setor de habitação de baixa renda e, mais especificamente, do PMCMV. O método e os resultados dessa etapa da pesquisa foram apresentados em artigo publicado por Triana, Lamberts e Sassi (2015), em dezembro de 2015, na revista internacional *Energy Policy*.

Estas fases foram elaboradas nesta etapa da pesquisa:

1. Caracterização das habitações de interesse social com base nas informações do Censo de 2010;
2. Levantamento e caracterização de tipologias do PMCMV por faixa de renda;
3. Elaboração de modelos de projetos de edificações representativas por faixa de renda; e
4. Análise do desempenho térmico e energético dos projetos representativos diante da Etiqueta de Energia, considerando duas zonas bioclimáticas.

5.1.1 Caracterização das habitações de interesse social com base no Censo 2010

As informações disponibilizadas no Censo de 2010 foram usadas para uma aproximação inicial ao tipo de projetos mais recorrentes por faixa de renda, com base nos domicílios particulares permanentes

urbanos. Foram observados dados de tipologias usadas e características da habitação.

5.1.2 Levantamento e caracterização de tipologias do PMCMV por faixa de renda

Para o cumprimento desta etapa, foram selecionados projetos que representam a realidade nacional quanto à produção de novas habitações de interesse social e levantadas as características mais comuns apresentadas. A amostra dos projetos foi determinada a partir dos moldes colocados pelo Programa, enfocando as faixas de renda estabelecidas e, a forma como são elaborados os projetos dentro do setor e alinhados com o déficit habitacional. Para tanto, foi definida uma divisão entre os projetos por faixa de renda considerando as faixas presentes no PMCMV 2. Foram definidos dois níveis de renda: Nível 1, para projetos na faixa de renda familiar total de até três salários mínimos, com foco de até R\$ 1.600,00 (correspondente à Faixa 1 no PMCMV); e Nível 2, para projetos nas faixas de renda com mais de três e até R\$ 5.000,00 de renda familiar (correspondente às Faixas 2 e 3 no PMCMV). As Faixas 2 e 3 foram colocadas juntas porque se verificou que os projetos que atendem essas faixas de renda são muito similares, tendo diferenças principalmente nos subsídios que são dados às famílias. Para cada um dos níveis estabelecidos, foram adotadas diferentes abordagens.

Para os projetos no Nível 1, as informações foram obtidas a partir de diferentes fontes de dados, constituindo duas amostras:

-Amostra 1: identificação das principais tipologias construídas por meio de pesquisa na internet, de informações disponíveis na lista de projetos contratados para a Faixa 1 (CAIXA, 2014), divulgados pela Caixa, agência financiadora do PMCMV; e

-Amostra 2: projetos solicitados às companhias de habitação e aos agentes públicos, às prefeituras e às construtoras atuantes nesta faixa de renda.

A Caixa libera regularmente uma lista com todos os projetos nas áreas urbana e rural contratados pelo Programa para a Faixa 1. Na lista usada para a Amostra 1 constavam todos os empreendimentos que foram contratados pelo PMCMV para a Faixa 1 desde o início do Programa até 30 de abril de 2014. Foram selecionados os projetos urbanos considerados mais recentes, contratados em 2013 e 2014 que tivessem um número maior de unidades a serem entregues. Dessa forma, se teriam mais chances de se obterem informações na internet, permitindo a identificação

das principais tipologias usadas. Considerando o ano de contratação de 2013, foram selecionados projetos a partir de mil unidades, o que deu um total de 51 empreendimentos. Para o ano de 2014, foram selecionados os projetos a partir de 300 unidades, por constituir uma amostra menor ao compreender projetos somente até o mês de abril desse ano. Com isso, no ano de 2014 um total de 40 empreendimentos foram selecionados, o que, junto aos empreendimentos do ano de 2013, deu um total de 91 empreendimentos para uma possível identificação de tipologias de forma visual.

A Amostra 2 foi constituída por 29 projetos de diferentes regiões do país, dos quais dezesseis projetos foram obtidos com companhias de habitação e agentes públicos e treze projetos foram obtidos com construtoras e prefeituras. Com as companhias de habitação e agentes públicos do país buscou-se uma aproximação direta por e-mail e telefone, sendo solicitados projetos arquitetônicos executivos, de engenharia, levantamento de custos e memorial dos projetos usados atualmente no PMCMV. Das 29 companhias de habitação e agentes públicos hoje existentes no país (Figura 19), foi possível o retorno de oito delas, o que corresponde a 27,5% do total das companhias.

Figura 19 – Mapa mostrando os estados com companhias de habitação e agentes públicos associadas à ABC.



A Tabela 8 mostra a distribuição por tipologia e região do país em que se encontravam os 29 projetos obtidos para a Amostra 2. A amostra abarcou todas as zonas bioclimáticas do país.

Tabela 8 – Amostra 2 Faixa 1 – Número de projetos por tipologia.

Amostra 2– Faixa 1	Número de projetos por região e tipologia								N ^o . total de projetos
	Norte	Centro– Oeste	Sudeste	Sul					
Unifamiliar térreo isolado	1	3	1	6					11
Geminado térreo	2		1	3					6
Geminado 2 andares				2					2
Casa sobreposta 2 andares	1								1
Multifamiliar em H-4 andares	1			1					2
Multifamiliar em H-5 andares			2						2
Multifamiliar laminar 4 pavimentos			1	1					2
Outras tipologias			1*	2**					3
TOTAL projetos fornecidos									29

Notas: *Refere-se a um edifício multifamiliar em H de 13 pavimentos.

** Refere-se a projetos de casas geminadas em 3 andares.

Os dados levantados nos projetos foram divididos em: a) dados gerais, que incluiu zona bioclimática, programa ao qual atendia, tipologia, consideração de acessibilidade no projeto, área útil, área construída total, largura do beiral, existência de ventilação cruzada, número de ambientes, número de pavimentos, número de unidades tipo, dados com relação à ampliação (quando existente), tipo de ambientes, área útil e pé-direito dos ambientes, *lay-out* predominante; b) tipo de aquecimento de água, quando foi possível a identificação; c) áreas dos ambientes, parede em contato com o exterior, integração entre ambientes; d) dados da envoltória, com relação às paredes, às coberturas e ao piso, composição, capacidade térmica, transmitância térmica, existência de ático, especificação do forro, cor das paredes externas; e) dados das esquadrias com relação às portas e

janelas, quantidade, área e material das janelas, peitoril, fator de ventilação, fator de iluminação, forma de funcionamento, existência ou não de veneziana e tipo de vidro.

Para o Nível 2 de renda foram considerados projetos de construtoras atuantes no Programa, constituindo-se a Amostra 3.

A amostra de projetos no país para o Nível 2 tende a ser muito maior do que a do Nível 1 e portanto, mais difícil de obter. Nesse nível os projetos são elaborados, na sua maioria, por empreendedores isolados e empresas privadas, como construtoras tanto de baixo, médio e grande porte.¹⁰ Contudo, devido a esses projetos serem comercializados, encontram-se informações disponíveis na internet com maior facilidade. Conforme Pereira (2011), os projetos para essa faixa de renda são liderados por empresas menores de construção, mas, quando o PMCMV foi lançado, teve boa representatividade de empresas maiores, que representaram 13% dos projetos aprovados no PMCMV nesse ano. Desde o final de 2013 teve uma queda na participação no Programa de muitas empresas, que voltaram aos seus nichos iniciais de média e alta renda (BRODBECK, 2013). Não obstante, algumas construtoras maiores mantêm a sua atuação em projetos para o PMCMV aos quais é mais fácil o acesso. Portanto, para essa faixa de projetos, foi realizada uma abordagem de fontes secundárias, por meio do levantamento dos projetos mais recentes das maiores empresas construtoras, com o auxílio das informações em *sites* institucionais. Para a definição da amostra das construtoras que atuam nesse segmento, buscou-se informação no *Ranking* ITC– 2013 (ITC, 2013). O *Ranking* ITC mostra as 100 maiores construtoras do país e premia as construtoras por categorias regionais. As dez maiores construtoras em 2013 somaram 44% do total das construções de edificações no país construídas nesse ano pelas 100 maiores empresas. Além delas, buscaram-se projetos entre as construtoras “destaque” por região e outras grandes construtoras consideradas importantes no setor de baixa renda dentro do cenário nacional. Os projetos novos (considerando-se somente lançamentos e edificações em construção) das empresas que atuam no PMCMV e das quais puderam ser obtidas as informações necessárias, constituíram a amostra que foi levantada. No total foram analisados projetos de nove construtoras; seis delas encontravam-se entre as dez primeiras no *ranking* ITC e as outras três tinham destaque entre

¹⁰ É feita a ressalva que alguns projetos das companhias de habitação chegam a atender em especial até a Faixa 2 e, normalmente, quando o fazem, são projetos muito similares aos da Faixa 1, mas com mais acabamentos e incorporação de tecnologias, como, por exemplo, aquecimento solar.

empresas que constroem para o Programa. Ao todo foram coletados 79 empreendimentos.

Similar à faixa de renda anterior, os dados foram levantados em função de dados gerais, áreas dos ambientes, dados da envoltória e dados de esquadrias. Entretanto, foram indicadas algumas diferenças, pois essa amostra está constituída, na sua maior parte, por edificações multifamiliares. Para tanto, foram identificados os apartamentos considerados como tipo, ou seja, aqueles que apresentavam diferenças significativas entre si, como em relação ao número de ambientes ou à situação em planta¹¹, que refletia na disponibilidade ou não de ventilação cruzada, entre outros aspectos. Não foram considerados apartamentos não representativos como apartamentos térreos acessíveis ou apartamentos duplex de cobertura. Para cada uma das construtoras que constituíram a amostra, foram levantados todos os projetos de lançamento e em construção das capitais dos estados onde elas atuam. E, quando não foram observados projetos nas capitais, procurou-se nas cidades com o maior número de habitantes do estado. Com isso, considerou-se ter uma amostra representativa e atual do universo edificado pelas maiores construtoras nessa faixa de renda. Os dados levantados foram divididos em dados relacionados ao empreendimento de forma integral e dados específicos dos apartamentos tipo. Do empreendimento foram levantados dados com relação a zona bioclimática, cidade, faixa de preço, subsídios no PMCMV, tipologia (linear, planta em H, etc.), número de blocos, número de pavimentos, quantidade de apartamentos por pavimento, quantidade de apartamentos tipo, quantidade e localização das vagas de garagem. Também foi contabilizada a quantidade de apartamentos de cada tipo no empreendimento. Quanto ao tipo de aquecimento de água, não foi possível obter-se informação, portanto não entrou na análise neste Nível de renda.

Para ter-se uma melhor representação da amostra do Nível 2, foi estimada a faixa de preço da habitação em torno de R\$ 170.000,00, que representava, na fase 2 do PMCMV, o valor máximo de venda do imóvel para municípios com população igual ou superior a um milhão ou para as outras capitais estaduais, garantindo um subsídio de R\$ 18.000,00 pelo Programa.

Para os dois níveis considerados, os fatores de ventilação e iluminação das esquadrias foram especificados de acordo com o Anexo II – Tabela de desconto das esquadrias – da Etiqueta de Energia. E as

¹¹ Considerando apartamento de esquina ou na posição intermédia, ou seja, com apartamentos vizinhos.

propriedades físicas dos componentes da envoltória foram especificadas conforme cálculos empregando a NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), assim como o Anexo V da portaria INMETRO nº 50 de 2013 (BRASIL, 2013b) e a NBR 15220-3 (ABNT, 2005a). Finalmente, foi considerado que todas as edificações tinham contato com o solo.

5.1.3 Elaboração de projetos de edificações representativas por faixa de renda

A partir da amostra coletada na etapa anterior, foram levantadas as principais tipologias formais, por faixa de renda, presentes no PMCMV. As características arquitetônicas predominantes de cada tipologia foram estimadas em função da média e moda dos dados levantados nas amostras. Para dados que permitem imprecisões, como áreas dos ambientes, foram usadas médias com o seu correspondente desvio padrão e aplicada a moda no caso de elementos comerciais (janelas, portas). Os dados de área de ambientes foram normalizados usando o teste de *Kolmogorov-Smirnov* para amostras de até 30 casos e com Qui-Quadrado para amostras com mais de 30 casos. Para as amostras menores, foi aplicada a distribuição *t de student* para achar os intervalos necessários a serem adotados nos casos dos parâmetros em que foram usadas médias, para um erro máximo provável com 95% de confiança. Isso segue o procedimento adotado por Schaefer et al. (2012). Para amostras maiores, foi adotado o desvio padrão como intervalo. Os dados de composições dos materiais e dos componentes foram estimados com base nos memoriais prescritivos disponíveis. Para a tipologia de casa unifamiliar, o projeto representativo foi ajustado, quando necessário, para seguir a norma de acessibilidade da NBR 9050 (ABNT, 2004), que é um dos requisitos do PMCMV na Faixa 1. Isso permitiu representar, de forma mais precisa, o que é exigido no Programa.

5.1.4 Análise dos modelos representativos com relação ao seu desempenho termoenergético atual

Por último, foi analisado o desempenho termoenergético atual dos projetos definidos como representativos empregando a metodologia da Etiqueta de Energia por meio do seu método prescritivo (BRASIL, 2012). No método prescritivo a análise do desempenho termoenergético das edificações é avaliada para a zona bioclimática. Assim, os projetos representativos foram avaliados considerando a zona bioclimática três

(ZB 3) e a zona bioclimática oito (ZB 8). A Etiqueta de Energia pode ser avaliada tanto pelo método prescritivo quanto pelo método de simulação. O método prescritivo é mais genérico e foi estabelecido por meio de equações de regressão linear múltipla, desenvolvidas com base em simulações (SORGATO; LAMBERTS, 2011). O método por simulação permite análises mais detalhadas, sendo mais complexo. Considerando o objetivo proposto nessa etapa, as análises foram realizadas pelo método prescritivo, de forma a ter uma base do comportamento atual termoenergético do setor de habitações de interesse social no país.

Na metodologia da Etiqueta de Energia a avaliação é realizada em níveis que podem variar de A (mais eficiente) até E (menos eficiente). São considerados somente os ambientes de principal ocupação¹² na avaliação. Inicialmente, o ambiente da sala de estar e os quartos foram avaliados segundo o seu desempenho no verão por meio do indicador de graus-hora de resfriamento, considerando a edificação naturalmente ventilada. Posteriormente, os mesmos ambientes foram avaliados com relação ao inverno e de acordo com as necessidades de aquecimento artificial considerando o indicador de kWh/m². A avaliação de aquecimento é aplicável somente às zonas bioclimáticas 1 a 6, assim foi considerada somente na zona bioclimática 3. As necessidades de uso de ar-condicionado para refrigeração foram também estimadas, somente para os quartos e com caráter informativo exclusivamente, pois essa informação não é computada no cálculo final do desempenho da edificação segundo a metodologia da Etiqueta de Energia. Em um segundo estágio foi realizada a avaliação para a envoltória, que combina o desempenho obtido nos ambientes no verão e inverno, por meio de uma porcentagem que varia conforme a zona bioclimática. A avaliação final da edificação combina o desempenho da envoltória e do sistema de aquecimento de água usado.

Para a avaliação da envoltória, foram considerados o atendimento a alguns pré-requisitos em cada um dos ambientes, às características da envoltória e à obtenção de algumas bonificações possíveis. Os pré-requisitos têm relação com limites estabelecidos por zona bioclimática considerando transmitância térmica, capacidade térmica e absortância solar das paredes externas e cobertura. Igualmente são considerados como pré-requisitos: garantia de ventilação cruzada; porcentagens de área de ventilação mínima nos ambientes de ocupação com relação à área do piso do ambiente, sendo 8% para ZB 3 e 10% para ZB 8; e iluminação natural, considerando 12,5% de área de iluminação na janela com relação à área

¹² Nos projetos analisados foram sala de estar/cozinha e quartos.

do piso. As características da envoltória que devem ser consideradas têm relação com a área do ambiente, propriedades térmicas de paredes externas e coberturas e o fator de ventilação e iluminação das janelas¹³. Bonificações são possíveis de serem obtidas por meio de dispositivos especiais de ventilação natural, aumento da iluminação natural e uso racional da água entre outros¹⁴ (BRASIL, 2012).

A avaliação do sistema de aquecimento de água considera como pré-requisitos o isolamento da tubulação e avalia o sistema usado. Sistemas de aquecimento solar e a gás têm o potencial de obter A, enquanto o sistema que usa chuveiro elétrico exclusivamente somente pode obter D ou E, dependendo da potência do aparelho. Nesta pesquisa foi assumido que, para projetos que usam sistema de aquecimento por chuveiro elétrico, a sua potência é maior do que 4.600W, consequentemente sendo avaliado como E.¹⁵ A metodologia usada na Etiqueta de Energia encontra-se mais detalhada em Scalco et al. (2012).

Conforme essa avaliação, os resultados de desempenho térmico e energético foram mostrados graficamente usando os níveis da Etiqueta de Energia de acordo com as seguintes etapas:

- Desempenho térmico dos ambientes de permanência prolongada no verão para as zonas bioclimáticas 3 e 8, e no Inverno para a ZB 3;
- Desempenho térmico total da envoltória, considerando juntos verão e inverno para a ZB 3;
- Desempenho térmico da unidade habitacional considerando a envoltória junto ao sistema de aquecimento de água; e
- Desempenho térmico dos quartos no caso se o condicionamento artificial para refrigeração fosse usado.

¹³ Fator de ventilação e iluminação refere-se a dados presentes no Anexo II do RTQ-R com relação a porcentagem de ventilação e iluminação permitida pelas janelas.

¹⁴ Foi considerado que todos os projetos representativos atendiam a dois créditos, possíveis de serem obtidos na bonificação de iluminação natural. Um deles está relacionado a uma profundidade menor dos ambientes com relação às janelas e o outro a uma maior refletância do forro. Esses dois critérios somam 0,3 pontos, o que afetou, por vezes, a conta final na avaliação das unidades.

¹⁵ Conforme a tabela de consumo do Inmetro de Janeiro de 2015 (INMETRO, 2015), 82% dos chuveiros elétricos certificados tinham potência superior a 4.600W. Um chuveiro elétrico com potência inferior a 4.600W terá pontuação D na Etiqueta de Energia e portanto, podem ser observadas mudanças para a avaliação final da edificação que combina a envoltória e o desempenho do sistema de aquecimento de água quente.

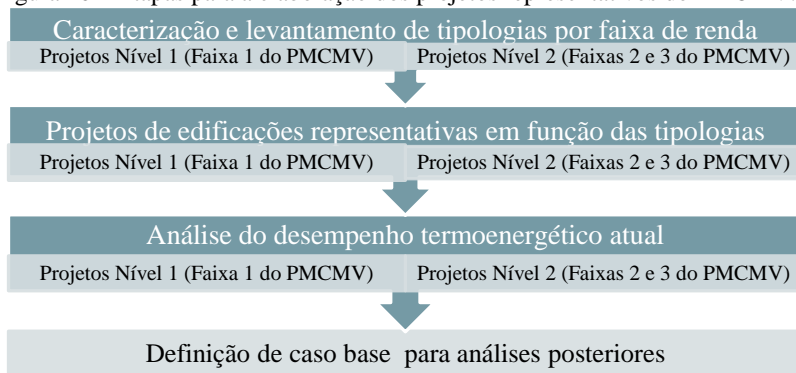
Salienta-se que somente no Nível 1 em que foi possível identificar o sistema de aquecimento de água, a avaliação final da unidade incluiu o nível obtido pela envoltória e o sistema de aquecimento de água.

Devido à cor das paredes externas não ser um parâmetro usualmente definido, em especial nos projetos do Nível 1 foi adotada uma avaliação com relação a essa variável. Dessa forma foram consideradas três absorptâncias térmicas das paredes externas para avaliação: 0,3, 0,5 e 0,7 com uma única orientação. Igualmente nesse setor é comum que o mesmo projeto seja usado em diversas orientações solares, sem considerar-se uma abordagem bioclimática. Assim, foi realizada uma avaliação para as tipologias do Nível 1 considerando quatro azimutes 0° , 90° , 180° e 270° com absorptância da parede externa 0,6. Essa absorptância representa o limite para maiores ou menores transmitâncias térmicas aceitas nas paredes externas na Etiqueta de Energia e, assim foi usada para análise do comportamento em diferentes orientações.

Para as tipologias de edifícios multifamiliares, foi estabelecido para análise um apartamento com orientação de fachada norte e quando tive-se mais do que uma fachada norte e leste. Por fim, para as tipologias multifamiliares foram analisados os apartamentos por pavimentos considerando térreo, tipo e cobertura, com base nos requisitos de avaliação para edificações desse porte exigidos na Etiqueta de Energia.

Como resultado dessa etapa, além das tipologias adotadas, pode ser identificada aquela que apresentou comparativamente o desempenho mais baixo e a maior representatividade com relação às outras e foi, portanto, escolhida para as análises posteriores. Coloca-se como limitação a análise dos projetos representativos limitados à edificação em si. A Figura 20 mostra, de forma simplificada, as fases que foram realizadas nesta primeira etapa.

Figura 20 – Etapas para a elaboração dos projetos representativos do PMCMV.



5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no Censo de 2010, observou-se que, para domicílios particulares permanentes urbanos e considerando todas as faixas de renda, a casa representa 85% do total de habitações no país, enquanto o apartamento representa 12,5% (BRASIL; IBGE, 2010). Se analisados os domicílios em relação à renda familiar mensal e faixas do PMCMV, a casa unifamiliar e a casa de vila ou em condomínio têm a maior porcentagem na Faixa 1, com preponderância da casa unifamiliar, enquanto o apartamento representa a maior porcentagem nas Faixas 2 e 3 (Tabela 9). Com relação ao número de banheiros nas habitações observou-se o uso de um banheiro predominantemente na Faixa 1, enquanto na Faixa 2 foram 1 e 2 banheiros em porcentagens similares. Na Faixa 3 a tendência foi para o uso de mais de um banheiro, sendo dois ou três banheiros por unidade habitacional (BRASIL; IBGE, 2010).

Tabela 9 – Dados do Censo 2010 com relação a tipologias de habitações urbanas.¹⁶

	Total de habitações urbanas (1)	Porcentagem com relação à (1) (%)		
		0 a 3 S.M	mais de 3 a 5 S.M	entre 5 e 10 S.M
Urbano (%)	49.226.751			
Casa	41.818.352	57.90	19.16	13.64
Casa de vila ou em condomínio	975.918	46.78	15.68	16.08
apartamento	6.147.888	22.75	17.67	26.44

Nota: S.M = salários mínimos

Fonte: com base em Brasil e IBGE (2010).

A seguir são apresentados os resultados para os dois níveis estimados de renda.

5.2.1 Resultados para o nível 1 de renda familiar

Dos 91 projetos que constituíram a **amostra 1** somente foi possível obter-se informações de 47 empreendimentos, os quais representaram 54.591 unidades habitacionais em todas as regiões do país. As tipologias identificadas como predominantes nesta amostra foram a casa unifamiliar térrea, a casa geminada térrea, a casa sobreposta linear, a multifamiliar com planta em formato H de quatro e cinco pavimentos e a multifamiliar linear. Dentre todas as tipologias, a de maior frequência de ocorrência foi a da casa unifamiliar térrea com 35% do total da amostra. As edificações multifamiliares com planta em formato H de quatro e cinco pavimentos representaram 29% da amostra. As tipologias de casas térreas geminadas e sobrepostas representaram cada uma em torno de 10%. A Tabela 10 mostra as informações que foram levantadas na amostra 1.

¹⁶ Informações no Censo encontram-se divididas por salários mínimos, sendo de até três, mais de três a cinco, mais de cinco a dez salários mínimos e outros. No PMCMV 2 encontram-se divididas em três faixas de renda. Para relacionar os dados com as faixas de renda do PMCMV foi feita uma aproximação com relação aos salários mínimos equivalentes.

Tabela 10 – Resultados amostra 1.

	Total por região (em unidades habitacionais)					Total geral	
	Norte	Nord.	Centro Oeste	Sudeste	Sul	Total	% do total
Casa unifamiliar térrea	4.589	9.176	1.356	2.800	1013	18.934	35
Casa geminada térrea	0	1.414	1.015	2.383	454	5.265	10
Casa sobreposta 2 andares linear	0	4.695	1.080	0	0	5.774	11
Multifamiliar com planta em formato “H” de 4 andares	2.000	4.619	1.056	2.460	0	10.135	19
Multifamiliar com planta em formato “H” de 5 andares	0	2.947	0	2.640	0	5.587	10
Multifamiliar Linear	0	0	0	8.896	0	8.896	16
Outros	0	0	0	500	0	500	1
Total						54.591	100

Considerando-se todas as tipologias de casa diante de todas as tipologias de edifício multifamiliar, obtiveram-se porcentagens muito similares. Contudo, com alguma vantagem numérica ainda para a tipologia de casa. Para a tipologia do edifício multifamiliar linear, deve ser feita a ressalva de que as unidades contabilizadas referem-se a um único empreendimento no Sudeste, ou seja, embora com um número alto, não representou frequência de ocorrência. Analisando os resultados por região, a tipologia unifamiliar isolada representou a maior porcentagem nas regiões Nordeste e Norte, a casa geminada térrea destacou-se na região Sudeste, a casa sobreposta na região Nordeste e os multifamiliares com plantas em formato H foram encontrados com destaque nas regiões Nordeste e Sudeste.

Na amostra 1 também foi observado que as casas sobrepostas apresentavam média de quatro casas juntas. As casas unifamiliares usualmente possuíam uma sala, dois quartos, banheiro e cozinha

conjugada com área de sala de estar variando em torno de 40 m². Entre os materiais mais usuais, foram observados o bloco cerâmico, o bloco de concreto e paredes em concreto de 10 cm. Os apartamentos variavam entre 40 m² e 50 m², com dois quartos, sala, cozinha, banheiro e área de serviço. As esquadrias eram em alumínio ou ferro, usualmente sem venezianas, e, quando do uso de venezianas, muitas delas em cores escuras e de correr. A cobertura usualmente era em telha de barro. Alguns empreendimentos maiores combinavam mais de uma tipologia, mas, de forma geral, foram mantidas as tipologias levantadas. Observou-se também que, para as construtoras maiores, que estão também mais presentes nas Faixas 2 e 3, o predomínio no Nível 1 de renda foi por edificações de blocos com planta em formato H de quatro e cinco pavimentos.

Dos 29 projetos que constituíram a **amostra 2**, a tipologia mais presente entre os dezesseis projetos adquiridos por meio de companhias de habitação, foi novamente a casa unifamiliar térrea, seguida da casa unifamiliar geminada térrea. Os outros treze projetos dessa amostra, obtidos com construtoras e prefeituras, mostraram como tipologia predominante casas térreas geminadas e edifícios multifamiliares com planta em formato H de quatro e cinco pavimentos.

Considerando-se as amostras 1 e 2, as tipologias adotadas como projetos representativos para a faixa de renda do Nível 1 foram a casa unifamiliar térrea, a casa geminada térrea e o edifício multifamiliar com planta em formato H de quatro e cinco pavimentos (Figura 21). Isso é coerente com a tendência dos dados apresentados no Censo de 2010. Os projetos considerados para a elaboração dos projetos representativos foram os da amostra 2, onde se tinham características construtivas em detalhe. Assim, para a casa unifamiliar térrea, a amostra foi composta de onze projetos; para o edifício em H de quatro e cinco pavimentos, por quatro projetos e, para a casa geminada térrea, por seis projetos. A seguir são mostrados os resultados por tipologia nessa faixa de renda.

Figura 21 - Projetos representativos das tipologias para o Nível de renda 1.



a) casa unifamiliar térrea



b) casa geminada térrea



c) multifamiliar com planta em "H"

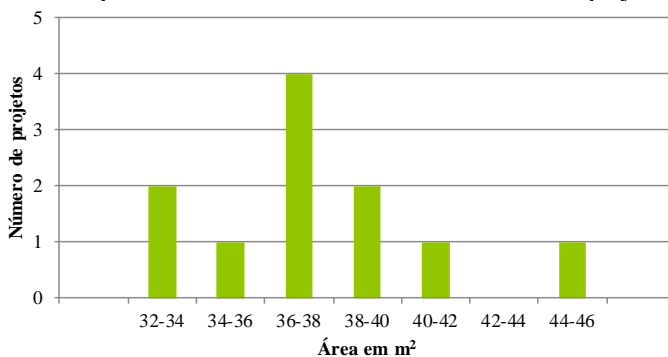
5.2.1.1 Casa unifamiliar isolada

Nesta seção são mostradas as características definidas para o projeto da casa unifamiliar térrea, com base na amostra levantada e, a avaliação do seu desempenho termoenergético.

a) Características do projeto

Os onze projetos avaliados nessa tipologia cobriam quatro regiões do país: Norte (Pará), Centro-Oeste (Goiás e Distrito Federal), Sudeste (São Paulo) e Sul (Paraná e Santa Catarina). A maioria dos projetos eram usados no estado e alguns somente no município. A data dos projetos variava entre 2012 e 2014. Seis deles previam questões de acessibilidade no projeto conforme a NBR 9050; e todos apresentaram ventilação cruzada. Em quatro projetos foi observado o uso de aquecimento solar para o aquecimento de água, enquanto nos outros sete foi especificado o chuveiro elétrico para esse fim. Somente quatro dos projetos possuíam veneziana nos quartos, tendo sido especificada a veneziana em dois deles para a sala. A maioria dos projetos eram financiados pelo FAR, alguns pela Oferta Pública e outros não apresentavam essa especificação. Finalmente, sete projetos ofereciam possibilidade de ampliação, um dos requerimentos do PMCMV. O mais comum foi a ampliação por meio de um quarto com área média de $9,0\text{m}^2$ e circulação com área média de $1,18\text{m}^2$. Com relação à área útil a maior frequência de ocorrência encontrou-se no intervalo entre 36 e 38m^2 (Figura 22).

Figura 22 – Frequência de ocorrência da área útil na amostra de projetos.



O valor do pé-direito oscilou entre 2,50 m e 2,60 m sendo 2,50 m o valor mais frequente. Contudo destaca-se o maior valor encontrado na região do Norte com 2,80 m. As áreas em todos os projetos eram compostas de sala de estar, jantar, cozinha, dois quartos e um banheiro. A maioria dos projetos (63%) apresentou a cozinha integrada com a sala de estar/jantar. Somente três projetos apresentaram espaço externo de sala de estar (pátio) e, quando tinham, a área média foi de 2,71 m². Em todos os projetos a área de serviço era externa, sendo somente em um deles coberta. A Tabela 11 mostra os valores encontrados nos ambientes e nas esquadrias dos projetos levantados, assim como os valores adotados no projeto representativo.

Tabela 11 – Valores na amostra para o projeto representativo da casa unifamiliar térrea.

Áreas (m ²)	Valores na amostra (m ²)				Limites de valores a adotar (m ²)			Valor adotado
	Mín.	Máx.	Desvio padrão	Média	Intervalo t student	Valor mínimo a adotar	Valor máximo a adotar	
Área útil	32,72	44,49	3,35	37,27	2,36	34,91	39,64	39,74
Área com paredes	37,84	54,57	5,06	43,36	3,56	39,80	46,92	44,99
Sala de estar	7,05	13,98	2,88	10,18	2,03	8,15	12,21	17,83
Cozinha	3,36	8,62	1,76	6,13	1,24	4,89	7,36	
Quarto 1	7,2	10,01	0,86	8,34	0,61	7,74	8,95	8,07
Quarto 2	6,81	8,58	0,63	7,61	0,44	7,16	8,05	7,54
Banheiro	2,67	4,72	0,78	3,51	0,55	2,96	4,06	4,09
Espaço de circulação entre quartos	0	2,93	1,03	1,19	0,73	0,46	1,92	2,21
Janelas quartos	0,90	1,68	–	–	–	–	–	1,50**
Janelas sala de estar	0,90	4,03	–	–	–	–	–	1,50**
Janelas cozinha	0,40	1,44	–	–	–	–	–	1,20**

Notas: *Alguns valores foram ajustados para alcançar os requerimentos de acessibilidade da NBR 9050. **Adotado valor da moda na amostra.

As paredes na amostra eram na sua maioria compostas por bloco de tijolos cerâmicos, sendo bloco de concreto somente em um projeto. As cores das paredes tanto externas quanto internas não foram especificadas. A cobertura com maior frequência de ocorrência foi telha de barro cerâmica de duas águas com inclinação média de 23,6°. Em 72% dos casos, as coberturas apresentaram ático, sendo em 75% dos casos com

forro em PVC. Outras opções de forro foram laje maciça ou mista de 8 a 12 cm. O piso era na maioria dos casos um lastro de concreto com variação nas espessuras das camadas de regularização e brita, sendo piso com cerâmica mais 2 a 3 cm de argamassa de regularização, mais 4 a 5 cm de contrapiso e 3 a 5 cm de colchão de brita. Os projetos tinham duas portas de acesso, sendo na maioria dos casos metálicas, e, com veneziana ou vidro em alguns casos. As portas internas eram sempre em madeira. Quando do uso de venezianas, foram sempre de correr impedindo a iluminação total do ambiente. O material predominante das esquadrias foi tanto aço, quanto alumínio, sendo madeira e ferro em menor presença. Ressalta-se a presença de cobogós nos ambientes da cozinha e do banheiro no projeto da região Norte. A Tabela 12 mostra as características das esquadrias na amostra.

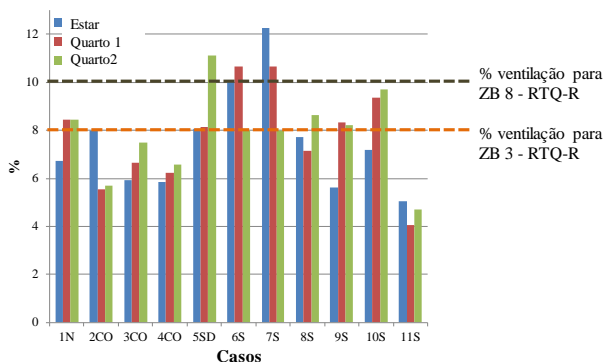
Tabela 12 – Características das janelas da amostra de casa unifamiliar isolada.

Amostra	Estar	Cozinha	Quarto casal	Quarto 2	Bwc
Área mínima (m ²)	0,9	0,4	0,9	0,9	0,24
Área máxima (m ²)	4,03	1,44	1,68	1,68	0,60
Desvio padrão (m ²)	0,85	0,39	0,31	0,22	1,13
Área - moda (m ²)	1,50	1,20	1,50	1,50	0,48
Peitoril – moda (m)	1,10	1,10	1,10	1,10	1,60
Fator de ventilação (FV) – moda	0,45	0,90	0,45	0,45	0,90
Fator de iluminação (FI) –moda	0,80	0,65	0,8	0,80	0,65
**% de ventilação em relação à área do piso – mínimo e máximo	5,0/ 12,3	4,4/ 17,9	5,5/ 10,6	4,7/ 11	5,5/ 14,0
**% iluminação em relação à área do piso – mínimo e máximo	5,9/ 21,8	4,4/ 25,0	6,2/ 18,9	8,4/ 15,1	4,0/ 11,5
Material – Moda	Alumínio/aço				
Tipo – Moda	C2	B	C2-4	C2-4	B
Veneziana - moda	Não				
Vidro - moda	Transparente 4mm				

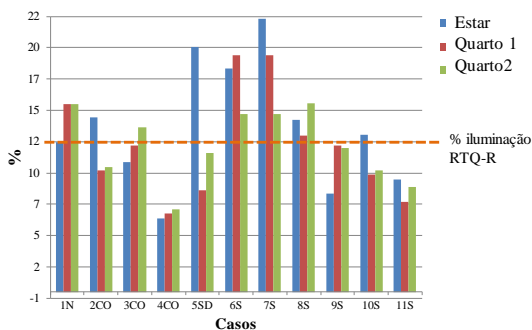
Notas: C2= correr duas folhas, C2-4= correr duas ou quatro folhas; B= basculante com esquadrias. **Calculado em função da área livre da janela para ventilação ou iluminação e a área do piso do ambiente conforme a Etiqueta de Energia.

A Figura 23 apresenta as porcentagens de ventilação e iluminação com relação à área do piso e os limites estabelecidos pela Etiqueta de Energia para as duas zonas bioclimáticas. Pode ser observado que esses parâmetros apresentaram grandes variações e muitos dos projetos não atingiram os limites mínimos necessários.

Figura 23 - Porcentagem de ventilação (a) e iluminação (b) com relação à área do piso nos diferentes ambientes.



a)

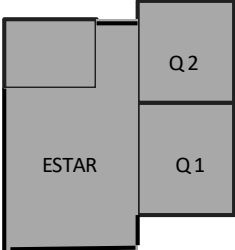
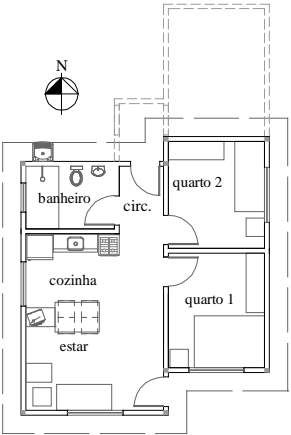



b)

Nota: Projetos identificados por número e por região como segue: N=Norte; CO=Centro-Oeste; SD=Sudeste e S=Sul.

O projeto representativo para a casa unifamiliar térrea com o layout de maior frequência de ocorrência e as principais características é mostrado na Tabela 13, com planta baixa e volumetria.

Tabela 13 – Características principais do projeto representativo para a casa unifamiliar térrea com possibilidade de ampliação.

<ul style="list-style-type: none"> –Ventilação cruzada; –Beiral: 50 cm; –Pé-direito: 2,50 m –Chuveiro elétrico para aquecimento de água, considerando potência do equipamento > 4.600 W; –Possibilidade de extensão de um quarto e circulação; -Sem área de convivência externa; –Área de serviço externa; –Piso: piso cerâmico 1 cm + 2 cm argamassa de regularização + 5 cm contrapiso + 3 cm colchão de brita; –Paredes: 13 cm (bloco de tijolo cerâmico 9x14x19 cm com reboco interno e externo) com $U=2,43$ W/m^2K e capacidade térmica=132 kJ/m^2K; 	<ul style="list-style-type: none"> –Portas externas: 2 de 0,80x2,10 m, metálicas; –Portas internas: 0,80x2,10m, madeira; –Cobertura: 2 águas, telha cerâmica + ático forro em PVC. Inclinação de 23,6°. Estrutura do telhado em madeira, $U=1,75$ W/m^2K, capacidade térmica=$21,4$ kJ/m^2K; $\alpha =0,6$; –Janelas: sala de estar e quartos: 1,50 m², 2 folhas de correr, peitoril=1,10 m (FV=0,45,FI= 0,8); cozinha: 1,20 m², 2 folhas de correr (FV=0,45,FI=0,80); banheiro: 0,48 m², janela basculante com esquadria, peitoril=1,50 m, FV=0,90; FI= 0,65 – Janelas sem venezianas –Vidro: 4 mm transparente; –Esquadrias em alumínio ou aço.
	
	

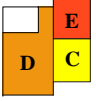
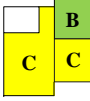
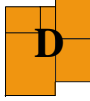
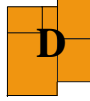
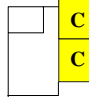
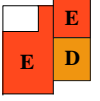
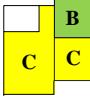
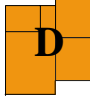
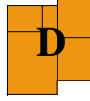
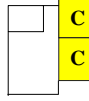
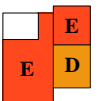
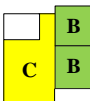
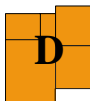
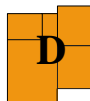
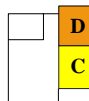
Nota: FV=Fator de ventilação; e FI= Fator de iluminação.

b) Desempenho termoenergético

É apresentada a avaliação de desempenho termoenergético realizada com base na Etiqueta de Energia nas duas zonas bioclimáticas. A Figura 24 mostra a avaliação termoenergética da casa unifamiliar para

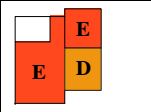
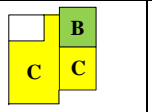
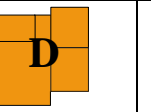
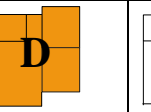
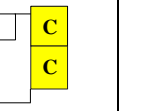
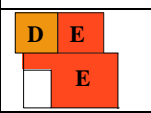
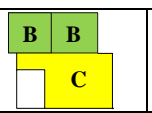
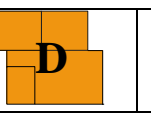
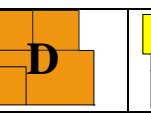
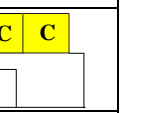
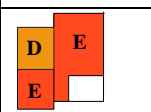
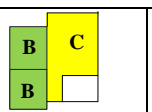
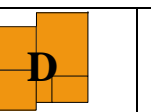
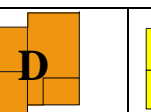
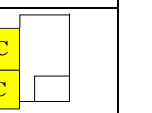
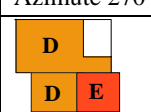
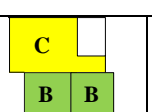
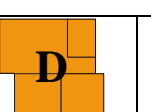
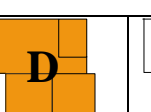
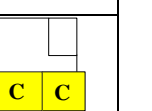
a situação com azimute 0° e três absortâncias solares nas paredes externas para a zona bioclimática 3.

Figura 24 – Resultados para ZB3 com azimute 0° e 3 absortâncias das paredes 0,3, 0,5 e 0,7 para a casa unifamiliar.

A B C D E					
α Par	Resf. Verão por ambiente	Aquec. inverno ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se o ar cond. para refrigeração é usado
Azimute 0°					
0,3					
0,5					
0,7					

Os resultados na ZB 3 são muito similares para todas as absortâncias analisadas, com uma pequena diferença nos resultados de verão no quarto 1, o qual obteve nível C com absortância 0,3. Para os outros cômodos e absortâncias a classificação por ambiente considerando a avaliação de verão ficou entre os níveis D e E. A avaliação da envoltória e da mesma junto ao sistema de aquecimento de água foi sempre D e o melhor desempenho ocorre no inverno, quando os ambientes alcançaram níveis B e C. A avaliação dos quartos para o uso hipotético de condicionamento artificial atingiu nível C na maioria dos casos. A Figura 25 mostra os resultados para a casa com paredes externas de absortância solar 0,6 e quatro azimutes para a ZB 3. Verificou-se desempenho similar na maioria dos azimutes, com algumas exceções no azimute 270°, contudo, a envoltória foi sempre classificada em nível D. Adicionalmente, foram realizadas algumas análises extras para diferentes orientações e absortância solar mais baixa (0,3). Nessa situação a classificação da envoltória ficou no nível C para os azimutes 90°, 180° e 270°. De forma específica, não foi atendido o pré-requisito da Etiqueta de Energia com relação ao fator mínimo de ventilação e iluminação na sala de estar.

Figura 25 – Resultados para ZB3 com quatro azimutes e (α) das paredes externas 0,6 para a casa unifamiliar.

α	Resf. Verão por ambiente	Aquec. inverno por ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se o ar cond. para refrigeração é usado
	Azimute 0°				
0,6					
	Azimute 90°				
0,6					
	Azimute 180°				
0,6					
	Azimute 270°				
0,6					

Nota: Na avaliação com diferentes orientações mostra-se nas Tabelas a rotação da planta da casa, considerando que o Norte está sempre para cima.

O melhor resultado no inverno na ZB3 era esperado dadas as características da casa, tanto em relação à área, abertura, quanto aos materiais. Igualmente por conta do baixo pé-direito. De certa forma, as características mais comuns usadas nessa tipologia proporcionam casas que atingem no seu interior temperaturas mais altas, sendo bom para inverno, entretanto mostrando um baixo desempenho no verão. A absorvância solar das paredes na ZB3 não mostra tanta importância nessa tipologia como estratégia única por conta da maior área de troca com o exterior, dada também pela cobertura. Também pelas características da geometria da habitação, a orientação, embora relevante, não mostra diferenças tão significativas quando tratada como única estratégia, cobrando mais relevância se associada à absorvância solar da parede. Por outro lado, a Figura 26 e a Figura 27 mostram as duas avaliações da casa unifamiliar para a zona bioclimática 8.

Figura 26 – Resultados para ZB8 com azimute 0° e 3 (α) 0,3, 0,5 e 0,7 para a casa unifamiliar.

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> A B C D E </div>				
α	Resf. verão ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. água (elétrico)	Se ar-cond. para refrig. é usado
Azimute 0°				
0,3				
0,5				
0,7				

Figura 27 – Resultados para ZB8 com quatro azimutes e (α) das paredes externas 0,6 para a casa unifamiliar.

α	Resf. verão por ambiente	Envoltória	Envoltória aquec. água (elétrico)	Se ar-cond. para refrig. usado
Azimute 0°				
0,6				
Azimute 90°				
0,6				
Azimute 180°				
0,6				
Azimute 270°				
0,6				

De forma geral, observou-se um desempenho mais baixo para o projeto representativo na ZB 8 com relação à ZB 3. A envoltória atingiu, no geral, nível E em todas as orientações com absorptâncias 0,5, 0,6 e 0,7. Para o uso do ar-condicionado nos quartos, o nível foi sempre D; e na avaliação da envoltória e aquecimento de água o nível final foi sempre D. Na ZB 8 não foi atendido o pré-requisito de área de ventilação nos três ambientes de permanência prolongada, assim como o pré-requisito de iluminação na sala de estar. Igualmente, não foi atendido o pré-requisito da cobertura considerando a transmitância e a absorptância, sendo o desempenho da cobertura nessa tipologia muito importante para o desempenho da casa de forma geral, por conta da alta troca de calor dessa superfície com o exterior. Em especial na ZB8 onde apresentam-se altas temperaturas ao longo do ano.

Um dos fatores que afetou o desempenho da envoltória nas duas zonas bioclimáticas foi a falta de sombreamento nas janelas. Para a casa, de forma integral, o uso de chuveiro elétrico para aquecimento de água afetou o desempenho.

Para alguns projetos do PMCMV, é obrigatório o uso de aquecimento solar, em especial nesta tipologia que está sendo avaliada. O que foi observado no levantamento dos projetos como mais recorrente foi o uso do chuveiro elétrico. Contudo, como forma de verificar a influência final na avaliação quando do uso de sistema de aquecimento solar, foram realizadas algumas avaliações para as duas zonas bioclimáticas. Isso foi feito somente considerando o azimute 0º e as três absorptâncias de paredes externas. Os resultados mostraram uma melhoria na ZB3. A avaliação final da envoltória junto ao sistema de aquecimento de água foi de nível D para nível C com absorptâncias 0,5 e 0,7 e até nível B com absorptância 0,3. Com isso, mostra-se a importância do uso desse sistema nessa tipologia e, em especial, para a ZB3, em que o aquecimento de água tem maior peso na avaliação da Etiqueta de Energia. Contudo, questiona-se também o peso do aquecimento de água nessa zona, pois permite mascarar, de certa forma, um baixo desempenho térmico da envoltória.

5.2.1.2 Casa geminada

A seguir são mostradas as características definidas para o projeto representativo da casa geminada térrea, tomando como base a amostra levantada. E, posteriormente, coloca-se a avaliação do desempenho termoenergético desse projeto representativo.

a) Características do projeto

A maioria dos projetos desta amostra atendiam aos recursos do FAR. Dos seis projetos, três eram de construtoras das regiões Norte e Sudeste e três da região Sul. Os anos dos projetos variaram entre 2010 e 2014 e a maioria não apresentava acessibilidade conforme a NBR 9050. As áreas oscilavam entre 35 e 40 m², com maior frequência de ocorrência entre 35 e 37 m². Todos os projetos tinham ventilação cruzada, aquecimento de água por chuveiro elétrico em 83% dos casos e pé-direito predominante em 2,50 m. A maioria dos projetos não previa ampliação nem pátio externo. Na Tabela 14 podem ser vistos os valores da amostra, assim como os valores adotados. Na amostra verificam-se mais *lay-outs* diferentes do que na tipologia anterior. Entretanto, 83% dos projetos apresentaram a cozinha integrada com a sala de estar; todos tinham área de serviço externa e, em 50% dos casos a posição do banheiro era entre a cozinha e um dos quartos. As paredes com maior frequência de ocorrência foram em tijolo de quatro ou seis furos e reboco interno e externo. Outras opções eram bloco de concreto e parede em concreto de 10 cm. A maioria dos projetos possuíam cobertura com telha cerâmica, estrutura do telhado em madeira e ático. Em 50% dos casos o forro era em PVC e nos outros 50% em laje de concreto de 8 cm. O piso era de cerâmica em todos os casos. Entretanto, a composição da laje do piso não foi especificada.

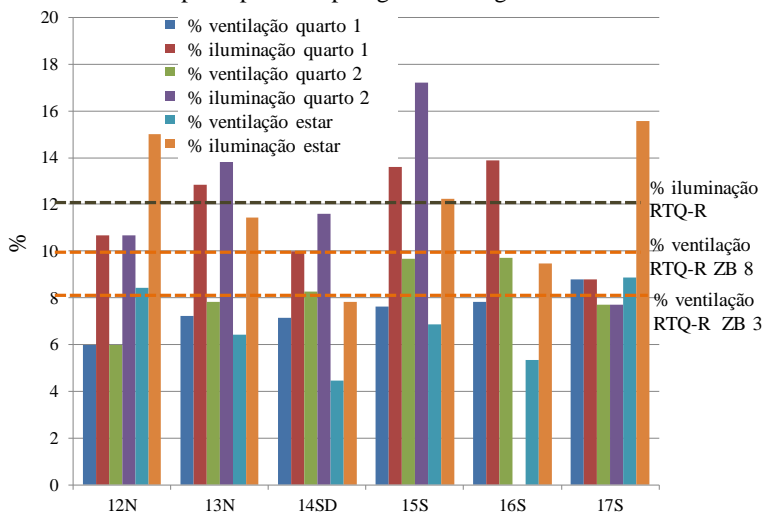
Tabela 14 – Valores na amostra e adotados para tipologia casa geminada térrea.

Áreas	Valores na amostra (m ²)			Valores limites a adotar (m ²)			Valor adotado
	Mín.	Máx.	Média	Intervalo <i>t student</i>	Valor mín. a adotar	Valor máx. a adotar	Projeto representativo (m ²)
Área útil unidade	35,2	40,41	37,35	1,61	35,74	38,95	38,12
Área útil com paredes	39,8	44,55	41,98	1,70	40,28	43,68	43,24
Sala de estar	6,75	14,14	10,70	2,37	8,33	13,06	10,90
Cozinha	3,97	6,75	5,17	0,81	4,36	5,97	5,87
Quarto 1	7,68	9,00	8,59	0,40	8,18	8,99	8,58
Quarto 2	6,96	9,00	7,88	0,75	7,12	8,63	7,80
Banheiro	2,04	3,88	3,11	0,62	2,50	3,73	3,00
*Circ. quartos	0,9	2,16	1,49	0,47	1,02	1,96	1,96

Nota: *Somente considerando os projetos que têm circulação entre quartos.

Nas esquadrias o material predominante em 100% da amostra foi ferro, sendo usada veneziana de correr nos quartos somente em um dos casos na região Sul. A Figura 28 mostra a variação nas porcentagens de ventilação e iluminação com relação à área do piso nos ambientes da amostra. Observa-se que nem sempre foram atendidos os limites mínimos da Etiqueta de Energia com relação a esses quesitos.

Figura 28 – Porcentagem de ventilação e iluminação com relação à área do piso para os ambientes principais na tipologia de casa geminada e limites do RTQ-R.

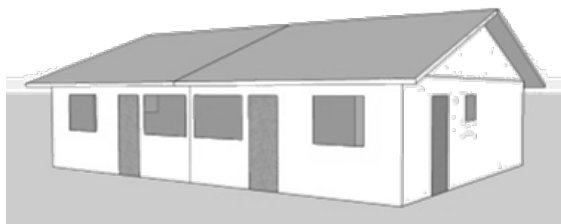
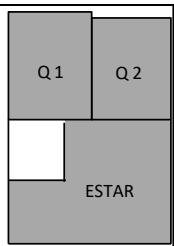
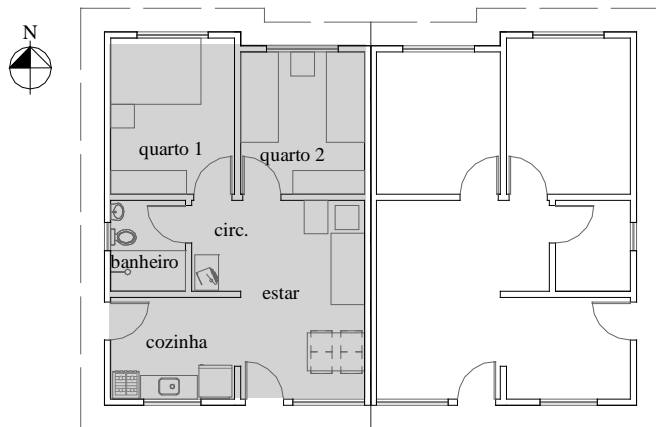


Notas: O número identifica o projeto e a letra mostra a região onde se localiza.

O projeto representativo para a casa geminada térrea com as características mais frequentes da amostra apresenta-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Principais características, planta e volumetria do projeto representativo para a tipologia de casa geminada.

- Ventilação cruzada; beiral: 50 cm; pé-direito: 2,50 m;
- Chuveiro elétrico para aquecimento de água com potência > 4.600 W;
- Área de serviço: externa;
- Paredes: 13 cm (bloco de tijolo cerâmico com 6 furos e reboco interno e externo) $U=2,43 \text{ W/m}^2\text{K}$; capacidade térmica=132 kJ/m²K;
- Cobertura: 2 águas, telha cerâmica com ático e forro em PVC; estrutura em madeira; $U = 1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$, capacidade Térmica = 21,4 kJ/m²K, $\alpha=0,6$, inclinação 21,36°
- Sem área de convivência externa.
- Janelas: Quartos e sala de estar:1,50 m², correr duas folhas (FV = 0,45; FI= 0,80); cozinha: 1,20 m², correr duas folhas (FV = 0,45; FI= 0,80); banheiro: 0,36 m², basculante com esquadria (FV=0,90 e FI=0,65); sem venezianas;
- Vidros: transparente 4mm; esquadrias em ferro;
- Portas externas: 2 metálicas 0,80x2,10 m no sala de estar e cozinha;
- Portas internas: 0,80x2,10 m em madeira;
- Projeto sem ampliação;



Nota: Destaca-se com cor cinza na planta a unidade que está sendo avaliada.

b) Desempenho termoenergético

Os resultados com relação à avaliação de desempenho termoenergético da tipologia de casa geminada são exibidos a seguir para as duas zonas bioclimáticas. A Figura 29 mostra os resultados para o azimute 0° e três absorptâncias solares nas paredes externas para a ZB 3.

Figura 29 – Resultados para ZB3 com azimute 0° e 3 absorptâncias das paredes externas 0,3, 0,5 e 0,7 para a unidade avaliada do projeto representativo de casa geminada térrea.

		A	B	C	D	E
α Par		Resf. verão por ambiente	Aquec. inverno por ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se o ar-cond. para refrigeração é usado
	Azimute 0°					
0,3						
0,5						
0,7						

Na ZB 3 para a avaliação de verão e para paredes com absorptância solar de 0,3 e 0,5, os ambientes atingiram níveis entre C e D. Para absorptância solar 0,7, o nível ficou entre D e E. A avaliação no inverno foi sempre nível C para a sala de estar e nível B para os quartos. Se fosse usado condicionamento de ar, o nível obtido seria C nos quartos; e a avaliação da envoltória e envoltória junto ao sistema de aquecimento de água ficou entre níveis C e D, variando em função da absorptância. A Figura 30 apresenta a avaliação com absorptância solar 0,6 nas paredes externas e quatro azimutes igualmente na ZB 3.

Figura 30 – Resultados para ZB3 com 4 azimutes e absorvência das paredes externas 0,6 para para a unidade avaliada do projeto representativo de casa geminada térrea.

α Par	Resf. verão por ambiente	Aquec. inverno por ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se o ar cond. para refrigeração é usado
Azimute 0°					
0,6					
Azimute 90°					
0,6					
Azimute 180°					
0,6					
Azimute 270°					
0,6					

A avaliação para verão por ambiente mostra níveis C ou D na envoltória dependendo do azimute; para todas as orientações no inverno o nível ficou entre B e C; na envoltória o nível foi geralmente C e na avaliação final junto ao sistema de aquecimento de água o nível foi D; e a avaliação com ar-condicionado apresentou comumente nível C nos quartos.

As duas avaliações, para a ZB 8 são mostradas a seguir. A Figura 31 mostra a avaliação para azimute 0° e três absorvências das paredes externas, enquanto a Figura 32 apresenta a avaliação para várias orientações e absorvência solar da parede de 0,6.

Figura 31 – Resultados para ZB8 com azimute 0° e 3 (α) das paredes - casa geminada térrea.

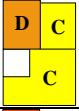
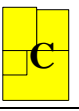
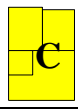
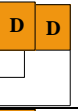
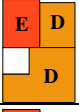


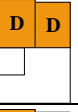
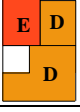


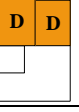
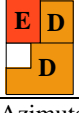


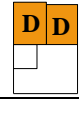



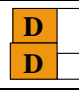
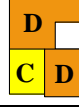







α Par	Resf. verão por ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se o ar- cond. Para ref. é usado
Azimute 0°				
0,3				
0,5				
0,7				

Figura 32 – Resultados para ZB8 com quatro azimutes e (α) das paredes externas 0,6 para a casa geminada térrea.

α	Resf. verão por ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se o ar- cond. para refrigeração é usado
Azimute 0°				
0,6				
Azimute 90°				
0,6				
Azimute 180°				
0,6				
Azimute 270°				
0,6				

A ZB8 apresentou um desempenho mais baixo em comparação com a mesma tipologia na ZB3. Para absorvâncias das paredes 0,5, 0,6 e 0,7, o nível da envoltória e da envoltória junto ao aquecimento de água em todos os azimutes foi sempre D, sendo somente C para (α) 0,3 com azimute 0°; e caso fosse usado ar-condicionado o nível alcançado nos quartos seria sempre D.

A absorvância solar das paredes teve maior influência nesta tipologia. Na ZB3 paredes com absorvâncias baixa e média atingiram nível C, na ZB8 parede com absorvância solar baixa atingiu o nível C. Uma das razões pode ser a menor troca de área com o exterior das paredes, uma vez que uma das paredes que seria externa é compartilhada. Dessa forma, a superfície das paredes expostas passa a ter maior importância. De forma geral, esta tipologia que mostra características e propriedades térmicas de componentes muito similar à tipologia anterior, de casa isolada, apresenta um melhor desempenho. Isto em grande parte à menor troca dos ambientes com o exterior conforme colocado anteriormente.

Fatores que afetaram o desempenho da envoltória foram a falta de sombreamento nas janelas e o fato de o pré-requisito da cobertura com relação à transmitância térmica e absorvância solar não ser atingido na ZB8, entre outros. Os pré-requisitos de iluminação não foram atendidos em ambas as zonas bioclimáticas e o pré-requisito de ventilação não foi atendido na sala de estar e no quarto 1 na ZB3 e em todos os ambientes de permanência prolongada na ZB 8.

5.2.1.3 Edifício multifamiliar com planta em formato H de quatro e cinco pavimentos – Nível de renda 1

Devido à amostra multifamiliar com planta em formato H ser muito reduzida foram integrados os projetos de quatro e cinco pavimentos disponíveis, pois apresentaram características muito semelhantes em relação ao pavimento tipo e envoltória.

a) Características do projeto

A amostra para esta tipologia foi constituída por quatro projetos localizados nas regiões Sudeste, Sul e Norte. Os projetos continham um apartamento típico e quatro apartamentos por andar. O sistema de aquecimento de água era para todos por chuveiro elétrico. Na Tabela 16 apresentam-se valores da amostra para o apartamento tipo e os valores adotados para o projeto representativo.

Tabela 16 – Valores da amostra do apartamento típico para o edifício representativo com formato de planta em “H” – Nível 1.

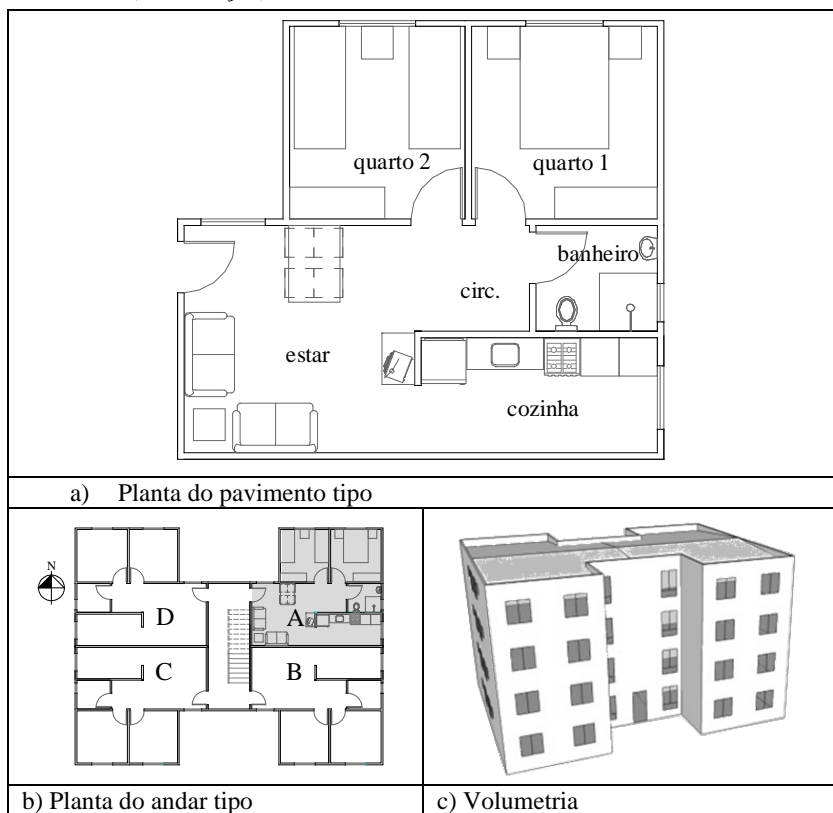
Áreas (m ²)	Valores na amostra			Valores limites a adotar			Valores adotados
	Mín.	Máx.	Média	Intervalo* <i>t student</i>	Valor mín. a adotar	Valor máx. a adotar	
Área útil	38,24	45,07	42,61	3,16	39,45	45,76	43,07
Sala de estar	10,54	16,06	12,80	2,40	10,39	15,20	12,81
Cozinha	6,06	7,75	6,93	0,70	6,23	7,62	6,84
Quarto 1	8,19	9,15	8,60	0,42	8,18	9,03	8,70
Quarto 2	8,12	8,75	8,46	0,27	8,18	8,73	8,28
Banheiro	2,80	3,69	3,22	0,40	2,82	3,62	3,13
Circulação entre quartos	0,98	3,23	1,24	1,09	1,51	3,70	2,97

Nesta tipologia, aproximadamente a metade dos projetos não atendeu aos pré-requisitos de ventilação e iluminação estipulados na Etiqueta de Energia, em especial no ambiente de sala de estar/cozinha. A Tabela 17 mostra as principais características adotadas para o projeto representativo, as plantas e a volumetria.

Tabela 17 – Principais características do apartamento tipo para a tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H - Nível de renda 1.

<ul style="list-style-type: none"> -Ventilação cruzada; pé-direito=2,50m; -Chuveiro elétrico para aquecimento de água com potência >4.600W; -Área de serviço integrada na cozinha; Sala de estar/jantar integrado; - Piso em cerâmica; -Paredes: painel de concreto 10 cm; U= 4,4 W/m²K; Ct =240 kJ/m²K; -Cobertura: telhado em fibrocimento, 4 águas com inclinação média de 4,33°; estrutura metálica ático com forro de laje em concreto 10 cm; U=2,06 W/m²K, Ct =233 kJ/m²K, α=0,7 	<ul style="list-style-type: none"> -Janelas: Quartos: 1,44 m², 2 folhas de correr (FV=0,45; FI=0,8); Sala de estar: 1,60 m² 2 folhas de correr com janela fixa embaixo (FV=0,375; FI=0,8); Cozinha: 1,20 m², 2 folhas de correr (FV=0,45; FI=0,80); Banheiro: 0,36 m², janela basculante, peitoril 1,50 m; -Janelas sem venezianas; -Vidros: transparente 4 mm; -Janelas em ferro ou alumínio; -Portas internas: 0,80x2,10 cm em madeira; -Sem acessibilidade; -sem sacada;
---	---

Tabela 17 (continuação)



b) Desempenho termoenergético

Conforme metodologia de análise na Etiqueta de Energia, para a avaliação da eficiência termoenergética, foram consideradas três posições de pavimentos: térreo, tipo e cobertura. Os resultados da análise realizada no apartamento típico (A) considerando o azimute 0° são descritos a seguir para cada uma das zonas bioclimáticas analisadas. A Figura 33 mostra a análise do apartamento típico para a zona bioclimática 3 e a Figura 34 para a zona bioclimática 8.

Figura 33 – Análise da Etiqueta de Energia para o apartamento tipo do edifício multifamiliar com planta em formato H no Nível 1 – ZB3.

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> A B C D E </div>					
α Par	Resf. verão por ambiente	Aquec. inverno por ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se ar cond. para refrigeração é usado
ZB3–Apartamento térreo – Azimute 0°					
0.3					
0.5					
0.7					
ZB3 – Apartamento tipo – Azimute 0°					
0.3					
0.5					
0.7					
ZB3 – Apartamento cobertura – Azimute 0°					
0.3					
0.5					
0.7					

Figura 34 – Análise da Etiqueta de Energia para o apartamento tipo do edifício multifamiliar com planta em formato H no Nível 1 – ZB8.

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> A B C D E </div>				
α Par	Resf. verão por ambiente	Envoltória	Envoltória + aquec. de água (elétrico)	Se ar cond. para refrigeração é usado
ZB8–Apartamento térreo – Azimute 0°				
0,3				
0,5				
0,7				
ZB8 – Apartamento tipo – Azimute 0°				
0,3				
0,5				
0,7				
ZB8 – Apartamento cobertura – Azimute 0°				
0,3				
0,5				
0,7				

Na ZB3 no apartamento térreo, a avaliação da envoltória e envoltória com aquecimento de água obtiveram, nível C, alcançando nível D somente na avaliação da envoltória junto ao aquecimento de água com parede de (α) 0,7. A cobertura apresentou o pior desempenho, com nível E na avaliação de verão em todos os ambientes e com nível D em todas as outras avaliações. O desempenho no inverno foi superior ao do verão, atingindo, no geral, nível C nos ambientes.

Para a ZB 8 observou-se desempenho inferior nesta zona quando comparado à ZB3, em especial para o apartamento da cobertura. O apartamento no térreo obteve nível C na maioria das avaliações. Porém, no caso de paredes externas com absorvância mais elevada, o nível foi D, sendo esse mesmo nível atingido para o uso do condicionamento de ar. O apartamento no pavimento tipo alcançou, no geral, nível C para paredes com baixa absorvância e nível D para paredes com (α) 0,5 e 0,7. O apartamento de cobertura foi usualmente nível E em todas as avaliações para paredes com (α) 0,5 e 0,7, enquanto obteve nível D para (α) mais baixa. No caso do uso de condicionamento de ar, foi comumente observado o nível D.

O comportamento da edificação nos três pavimentos mostrou influencias marcantes em ambas as zonas. O pavimento térreo, conforme esperado, é fortemente influenciado pelo contato com o solo, obtendo um melhor desempenho. Isto em parte por conta da temperatura mais baixa do solo que ajuda na retirada de calor, e, portanto, melhoria da temperatura interna dos ambientes nesse pavimento. Na ZB3, no apartamento térreo, somente uma absorvância solar alta da parede mostrou maior influência no comportamento térmico da edificação. Os apartamentos do pavimento cobertura, são fortemente influenciados pelo contato da cobertura com o exterior. Isto influencia no baixo desempenho térmico desses apartamentos, por conta da alta transmitância do componente cobertura associado à uma alta absorvância solar. Enquanto nos apartamentos intermediários, a absorvância solar das paredes, teve maior influência no desempenho, e apresentou melhor comportamento quando utilizou-se absorvâncias mais baixas.




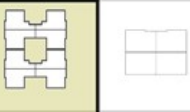

Assim, entre os fatores que afetaram o desempenho nas duas zonas encontram-se as paredes e os telhados, que não atenderam aos pré-requisitos da Etiqueta de Energia em termos de transmitância e capacidade térmica em conjunto com a absorvância. Igualmente, não foi atendido o critério de ventilação natural nos três principais ambientes e o de iluminação natural no ambiente de sala de estar. A falta de sombreamento nas janelas foi outro fator que cabe destacar.

Algumas avaliações exploratórias adicionais foram realizadas para esta tipologia. Uma delas foi em função do sombreamento nas janelas, pois na amostra a metade dos projetos apresentou venezianas nos quartos. Para isso, foi especificada uma veneziana de correr com abertura de 50%, conforme visto na amostra. Os resultados mostraram melhoria no desempenho nas duas zonas bioclimáticas, em especial para os apartamentos dos pavimentos tipo e cobertura, em que a avaliação da envoltória alcançou níveis entre C e D, sendo nível E somente para a ZB8 com (α) 0,7. Observou-se também que o nível atingido não pôde ser mais alto em virtude do não cumprimento do pré-requisito de iluminação nos quartos, causado pelo tipo de veneziana que só permite a entrada de iluminação em 50% da janela.

5.2.2 Resultados para o Nível 2 de renda familiar

A Tabela 18 mostra a distribuição por região e tipologia dos 79 projetos analisados no Nível de renda 2.

Tabela 18– Projetos por região e tipologia analisados para o Nível de renda 2 mostrando a tipologia em planta.

Número de projetos analisados – Total por região					Total
Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	
6	19	9	33	12	79
Número de Projetos por tipologia					Total
					
42	5	18	7	7	79

Da amostra, foram escolhidas duas tipologias representativas para esta faixa de renda: tipologia linear e tipologia com planta em formato “H”, sendo um total de 67 projetos. A amostra da tipologia linear foi 42 projetos, e a amostra da tipologia de planta em formato em “H” 25 projetos, pois foram somados os projetos pertencentes às tipologias de planta com formato H e H linear, por ter as mesmas características. Nos projetos desta amostra foi mais difícil a identificação de detalhes construtivos por conta de serem tomados da internet. Os detalhes foram com relação a materiais de paredes e coberturas, pé-direito, altura das

janelas, sistema de aquecimento de água usado e, por vezes, algumas áreas de ambientes. Como consequência disso, foram assumidas algumas premissas: materiais para paredes e piso foram considerados os de maior frequência de ocorrência nos poucos projetos que foram identificados; pé-direito assumido em 2,60m; a altura das janelas tomada em proporção com a largura observada em planta, considerando as fachadas; as poucas plantas que não apresentavam medidas com área foram escaladas no programa *AutoCAD*, a partir de medidas conhecidas padrão; e, por último, o sistema de aquecimento de água não entrou na avaliação. Os projetos mostraram também o não uso de venezianas com maior frequência. Os resultados por tipologia são mostrados a seguir.

5.2.2.1 Edifício multifamiliar com tipologia em planta linear

Nesta tipologia foi observada com maior frequência a ocorrência de empreendimentos com cinco a dez blocos, cinco pavimentos e, geralmente, seis a oito apartamentos por pavimento. A amostra mostrou três tipos de apartamentos diferentes recorrentes, com diferenças em relação ao número de quartos, banheiros e posição em planta. Esta última afetava o acesso ou não à ventilação cruzada. Os três tipos de apartamentos com as suas características principais podem ser observados na Tabela 19. Apartamentos do tipo 1 foram identificados em 42 projetos, do tipo 2 em 41 projetos e do tipo 3 em 24 projetos da amostra.

Tabela 19 – Dados gerais para os três apartamentos tipo na tipologia linear com base na amostra dos 42 projetos.

Tipo de apartamento	Características	Moda	% ocorrência
Apartamento 1	Posição	esquina	93
	Ventilação cruzada	sim	95
	Nº de quartos	2	95
	Nº de banheiros	1	95
Apartamento 2	Posição	médio	93
	Ventilação cruzada	não	93
	Nº de quartos	2	93
	Nº de banheiros	1	88
Apartamento 3	Posição	médio	92
	Ventilação cruzada	não	92
	Nº de quartos	2	100
	Nº de banheiros	2	96

a) Características do projeto

Quando identificado, os materiais mais usados foram piso em cerâmica, paredes em bloco de concreto estruturado (largura da parede 14 e 15 cm), cobertura com telha de fibrocimento e forro de laje em concreto. Cores usadas nas paredes externas foram no geral com absorvâncias baixas e médias. A Tabela 20 mostra as características dos três tipos de apartamentos na amostra e valores adotados no projeto representativo.

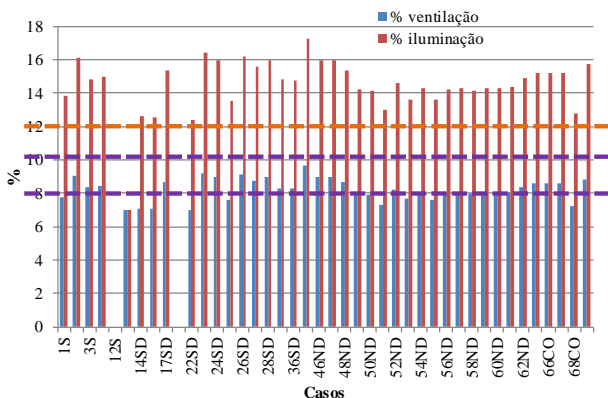
Tabela 20 – Características principais para os três apartamentos típicos na tipologia linear – Valores da amostra e adotados para o projeto representativo.

Ambiente	Dados	Valor adotado no projeto representativo		
		Ap1	Ap2	Ap3
Geral	Área útil média (m ²)	38,46	39,04	43,73
	Moda sacada (m ²)	0	0	0
Sala de estar	Área (m ²)	11,42	11,11	12,77
	Estar/jantar integrado – moda	sim	sim	sim
Cozinha/ Área de serviço	Integrada	sim	sim	sim
	Área (m ²)	6,58	6,58	6,57
Quarto 1	Área (m ²)	7,94	9,52	9,90
Quarto 2	Área (m ²)	7,41	7,77	7,80
Circ. Entre quartos	Área (m ²)	1,28	1,86	1,82
Banheiro 1	Área banheiro (m ²)	2,44	2,52	2,40
Banheiro 2	Área (m ²)			2,59
Hall entrada	Área (m ²)	1,53	0	0
Cobertura	Adotado: Telha de fibrocimento com forro de laje de concreto (10 cm) U= 2,06 W/(m ² K); Capacidade térmica= 233 kJ/m ² K			
Paredes	Adotado: bloco de concreto com reboco interno e externo; U= 2,78 W/(m ² K); Capacidade térmica= 209 kJ/m ² K			
Portas	(Moda – adotado) Porta de acesso 1,68 m ² ; porta quartos 1,47 m ² ; porta banheiro 1,26m ² , todas madeira			
Janelas	Quartos, sala de estar e cozinha (Moda) 2 folhas de correr FV=0,45 FI=0,80			
	Sala de estar: 1,80 m ² ; quartos e cozinha: 1,44 m ²			
	Banheiro (Moda) basculante FV=0,8 FI=0,8 Area:0,36 m ²			
	Venezianas externas (Moda) Não			

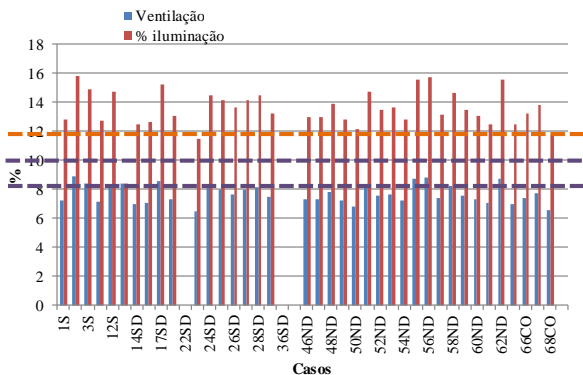
Nota: Na amostra algumas áreas de serviço não tinham janela, somente a abertura, mas isso não foi tão frequente.

A Figura 35 mostra as porcentagens de ventilação e iluminação da amostra, relacionadas com os limites da Etiqueta de Energia para a ZB 3 e a ZB 8, para o quarto 1 em dois tipos de apartamentos. Para o apartamento tipo 1 a maioria dos projetos atinge o limite de 8% de ventilação, exigido na ZB3. Entretanto, não acontece o mesmo para os apartamentos do tipo 2. Por outro lado, o limite de ventilação de 10% exigido na ZB 8 (projetos identificados para Norte-N e Nordeste-ND), não é atendido de forma geral. Já os limites de iluminação natural são facilmente alcançados.

Figura 35 – Porcentagens de ventilação e iluminação com relação à área do piso para o quarto 1 nos apartamentos 1(a) e 2 (b), tipologia linear do Nível de renda 2.



(a) Apartamento 1– Quarto 1

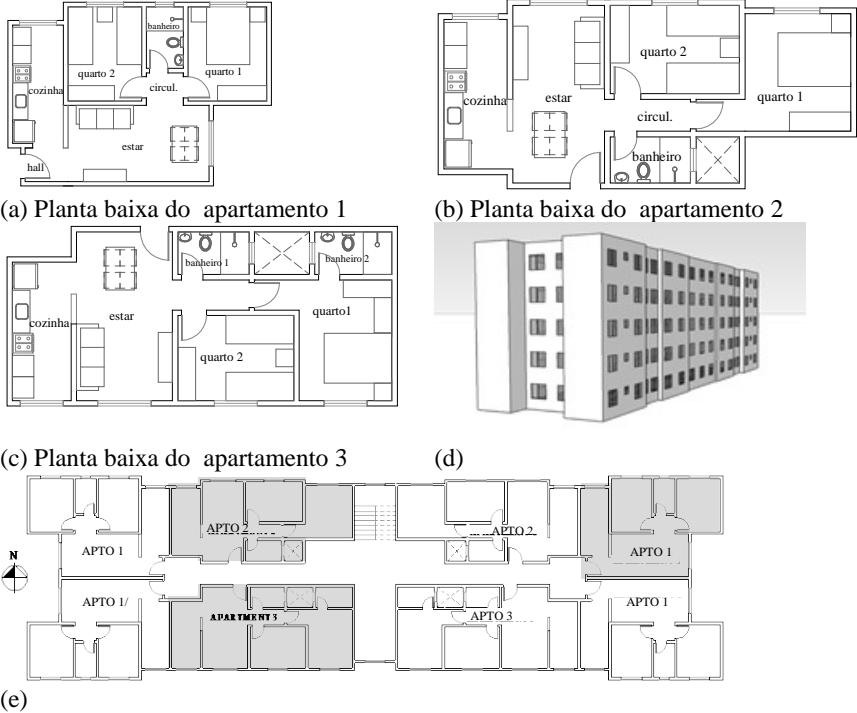


(b) Apartamento 2– Quarto 1

Notas: Os números identificam o caso e as letras a região onde se localiza o projeto.

A Figura 36 mostra a planta baixa do andar e apartamentos típicos, assim como a volumetria do projeto.

Figura 36 – Projeto representativo tipologia linear do Nível de renda 2.



Notas: Plantas baixas dos três apartamentos típicos (a, b e c); volumetria do projeto representativo (d) e planta do pavimento tipo (e) destacando em cinza os apartamentos que estão sendo avaliados na Etiqueta de Energia.

b) Desempenho termoenergético

As avaliações foram realizadas considerando somente o azimute 0º conforme mostra a Figura 36. Os resultados da avaliação dos três apartamentos típicos nas duas zonas bioclimáticas são apresentados em seguida. Os resultados para a ZB 3 podem ser observados na Figura 37 e na Figura 38. A Figura 37 mostra a avaliação para os apartamentos tipo 1, 2 e 3 nos pavimentos térreo e tipo. E a Figura 38 mostra a avaliação para o pavimento cobertura nos três apartamentos.

Figura 37 – Avaliação para a ZB 3 tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos pavimento térreo e tipo.

		ZB3 – Pavimento térreo					ZB3 – Pavimento tipo				
		α Parede	Resfriamento para verão por ambiente	Aquecimento para inverno por ambiente	Envoltória	Ar-condicionado	Resfriamento para verão por ambiente	Aquecimento para inverno por ambiente	Envoltória	Ar-condicionado	
Apartamento 1	0,3										
	0,5										
	0,7										
		ZB3 – Pavimento térreo					ZB3 – Pavimento tipo				
Apartamento 2	0,3										
	0,5										
	0,7										
		ZB3 – Pavimento térreo					ZB3 – Pavimento tipo				
Apartamento 3	0,3										
	0,5										
	0,7										

Notas: Avaliação frente à Etiqueta de Energia dos três apartamentos na ZB3 considerando (α das paredes externas 0,3- 0,5 e 0,7) para os apartamentos térreo e tipo.

Figura 38 - Avaliação para a ZB 3 tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos pavimento cobertura.

ZB3 – Pavimento cobertura					
	α Parede	Resfriamento para verão por ambiente	Aquecimento para inverno por ambiente	Envoltória	Ar-condicionado
Apartamento 1	0,3				
	0,5				
	0,7				
Apartamento 2	0,3				
	0,5				
	0,7				
Apartamento 3	0,3				
	0,5				
	0,7				

Na zona bioclimática 3, a avaliação dos apartamentos no térreo resultou em nível C para praticamente todas as análises e três absorções de paredes externas; no pavimento tipo dos apartamentos 2 e 3 foi geralmente atingido o nível C; no pavimento tipo do apartamento 1 as avaliações ficaram entre os níveis C e D. Os apartamentos na posição do pavimento da cobertura apresentaram o mais baixo desempenho quando comparado aos outros pavimentos, em especial para o desempenho no verão, em que a avaliação para a envoltória foi usualmente nível D. No inverno os apartamentos apresentaram melhor desempenho.

A Figuras 39 e 40 mostram a avaliação dos apartamentos tipo da tipologia linear para a zona bioclimática 8.

Figura 39 – Avaliação para a ZB 8 da tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos 1, 2 e 3 nos pavimentos térreo e tipo.

		ZB8 – Pavimento térreo			ZB8 – Pavimento tipo		
		Resfriamento para verão por ambiente	Envolória	Ar-condicionado	Resfriamento para verão por ambiente	Envolória	Ar-condicionado
Apartamento 1	α Parede						
	0.3						
	0.5						
	0.7						
		ZB8 – Pavimento térreo			ZB8 – Pavimento tipo		
Apartamento 2	0.3						
	0.5						
	0.7						
		ZB8 – Pavimento térreo			ZB8 – Pavimento tipo		
Apartamento 3	0.3						
	0.5						
	0.7						

Figura 40 - Avaliação para a ZB 8 da tipologia linear Nível de renda 2 apartamentos 1, 2 e 3 nos pavimentos térreo e tipo.

		ZB8 – Pavimento cobertura			
		α Parede	Resfriamento para verão por ambiente	Envoltória	Air-condicionado
Apartamento 1	0.3				
	0.5				
	0.7				
		ZB8 – Pavimento cobertura			
Apartamento 2	0.3				
	0.5				
	0.7				
		ZB8 – Pavimento cobertura			
Apartamento 3	0.3				
	0.5				
	0.7				

Novamente, observou-se desempenho mais baixo na ZB 8 quando comparado com o mesmo apartamento na ZB3, em especial para absorvâncias altas. E de forma mais específica, os apartamentos no pavimento de cobertura apresentaram o pior desempenho, sendo nível E para a avaliação da envoltória no apartamento 2 com absorvância solar 0,7, assim como no apartamento 1 com absorvância solar 0,5 e 0,7. A absorvância solar das paredes teve pouca influência nos apartamentos 2 e 3 que se localizam no interior da edificação por conta das poucas fachadas expostas, especialmente nos pavimentos térreo e tipo. Por outro lado, a

influência da absorvência solar nas paredes foi mais evidente no apartamento 1, que se encontra na extremidade da planta baixa e portanto mais exposto à troca com o exterior. Essa situação em especial no pavimento tipo. Os apartamentos da cobertura foram os mais afetados, novamente por conta da sua posição e influência do baixo desempenho da cobertura. Nas duas zonas bioclimáticas fatores que afetaram o desempenho foram resultado do fato de não serem atendidos alguns pré-requisitos, entre eles ventilação cruzada nos apartamentos tipo 2 e 3. Igualmente não foi atendida a porcentagem mínima de ventilação para todos os ambientes na ZB8, enquanto na ZB3 isso acontece poucas vezes no apartamento 1 no ambiente de sala de estar. Além disso, para absorvências maiores na cobertura e nas paredes, os limites de transmitância térmica não foram atendidos.

5.2.2.2 Edifício multifamiliar com planta em formato H – Nível de renda 2

Nesta amostra, que contou com 25 projetos, foram observados em média cinco blocos por empreendimento; quatro a seis pavimentos por bloco, sendo quatro com maior frequência de ocorrência (52%); quatro apartamentos por andar em 76% dos casos e um único apartamento típico por empreendimento em 64% dos casos.

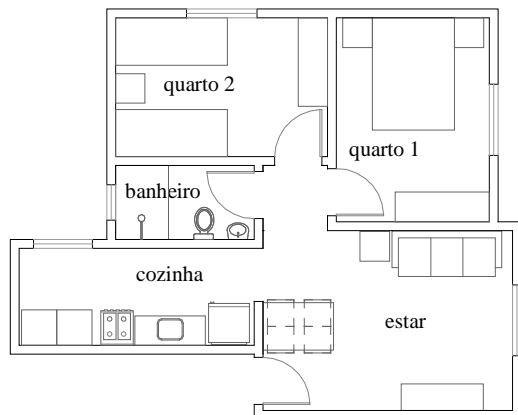
a) Características do projeto

Quando identificados os materiais, verificou-se o uso de telha de fibrocimento, em especial nas regiões Sul e Sudeste, enquanto na região Norte alguns projetos usaram telha cerâmica. A Tabela 21 mostra as características principais do apartamento considerado típico e a Figura 41 plantas e volumetria do projeto representativo.

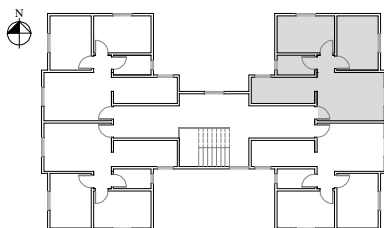
Tabela 21 – Principais características do apartamento tipo na tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H para o Nível de renda 2.

		Média	Intervalo <i>t student</i>	Valor mín. a adotar	Valor máximo a adotar	adotado no projeto
Dados gerais	Posição					esquina
	Área útil total (m ²)	40,54	1,67	38,86	42,21	41,28
	Ventilação cruzada					sim
	N ^o quartos					2
	N ^o banheiros					1
	Sacada (m ²)					0
Sala de estar	Área útil (m ²)	12,54	0,88	11,66	13,43	13,08
	Sala de estar/jantar integrado					sim
Cozinha/ área de serviço	Integrado					sim
	Tipo americana					não
	Área (m ²)	6,51	0,42	6,08	6,93	6,58
Quarto 1	Área (m ²)	8,76	0,44	8,32	9,20	8,97
Quarto 2	Área (m ²)	8,05	0,56	7,49	8,60	8,48
Circ.quartos	Área (m ²)	1,30	0,14	1,15	1,44	1,21
Banheiro	Área (m ²)	2,86	0,36	2,49	3,22	2,94
Hall entrada	Área (m ²)					0
Cobertura	Adotado: telha de fibrocimento com forro de laje em concreto (10 cm) U=2,06 W/(m ² K); Ct=233 kJ/m ² K					
Paredes	Adotado: bloco de concreto reboco interno e externo; U=2,78 W/(m ² K); Ct=209 kJ/m ² K					
Portas	1,68 m ² em madeira					
Janelas	Quartos, sala de estar e cozinha (Moda) 2 folhas de correr FV=0,45 FI=0,80; sala de estar e quartos: 1,44m ² ; cozinha: 1,20 m ²					
	Banheiro(Moda) janela basculante FV=0,8 FI=0,8; área:0,36m ²					
	Venezianas externas (Modo) Não em 92% dos casos					

Figura 41 – Projeto representativo tipologia multifamiliar com planta em formato H do Nível de renda 2.



(a)



(b)



(c)

Notas:

1. Planta baixa do apartamento tipo (a), pavimento tipo (b) e volumetria (c).
2. Em cinza destaca-se o apartamento que está sendo analisado.

b) Desempenho termoenergético

Os resultados da avaliação com relação ao desempenho termoenergético são mostrados para as duas zonas bioclimáticas em análise. A Figura 42 mostra os resultados nessa tipologia para a ZB 3.

Figura 42 – Resultados frente ao RTQ-R na ZB3 do apartamento típico no projeto representativo da tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H do Nível de renda 2.

		ZB3 – Apartamento no pavimento térreo					ZB3 – Apartamento no pavimento tipo				
		α Parede	Resfriamento para verão por ambiente	Aquecimento para inverno por ambiente	Envoltória	Ar-condicionado	Resfriamento para verão por ambiente	Aquecimento para inverno por ambiente	Envoltória	Ar-condicionado	
Apartamento típico	0,3		C C C	C C C	C C	C C	C D D	C C C	C	D D	
	0,5		C D C	C C C	C C	C C	D D D	C C C	D	D D	
	0,7		C D D	C C C	C C	C C	D E E	C C C	D	D D	

a)

		ZB3 – Apartamento no pavimento cobertura				
		α	Resfriamento para verão por ambiente	Aquecimento para inverno por ambiente	Envoltória	Ar-condicionado
Apartamento típico	0,3		D E E	C C C	D	D D
	0,5		E E E	C C C	D	D D
	0,7		E E E	C C C	D	D D

b)

Notas: Avaliação do apartamento típico nos pavimentos térreo e tipo (a) e no pavimento cobertura (b).

Na ZB 3 verificou-se que os apartamentos no pavimento térreo obtiveram nível C praticamente em todas as avaliações; os apartamentos nos pavimentos tipo e cobertura obtiveram nível D no desempenho da envoltória, com exceção do apartamento no pavimento tipo e absorvência solar das paredes 0,3, que foi avaliado em nível C. Na avaliação para verão, praticamente todos os ambientes do apartamento localizado no

pavimento da cobertura obtiveram nível E. A Figura 43 apresenta os resultados nessa tipologia para a ZB 8.

Figura 43 – Resultados frente ao RTQ-R na ZB8 do apartamento típico no projeto representativo da tipologia de edifício multifamiliar com planta em formato H do Nível de renda 2.

		ZB8 – Apartamento pavimento térreo			ZB8 – Apartamento pavimento tipo			
		α Par	Resfriamento para verão por ambiente	Envoltória	Ar condicionado	Resfriamento para verão por ambiente	Envoltória	Ar condicionado
Apartamento típico	0,3							
	0,5							
	0,7							
		ZB8 – Apartamento pavimento cobertura						
		α Par	Resfriamento para verão por ambiente	Envoltória	Ar condicionado			
Apartamento típico	0,3							
	0,5							
	0,7							

Na zona bioclimática 8 a avaliação da envoltória mostrou que para apartamentos nos pavimentos tipo e cobertura com paredes de absorções mais elevadas, os níveis alcançados foram D e E; o apartamento no pavimento térreo com absorção mais baixa atingiu nível C; e o apartamento na cobertura foi sempre avaliado em nível E para todas as absorções.

Novamente, o comportamento termoenergético dos apartamentos foi mais afetado pela posição em que se encontra (térreo, tipo e cobertura), dado que as características dos componentes como paredes e coberturas não mostram uma alta resistência térmica. A absorvância solar mais baixa nas paredes foi mais relevante no apartamento do pavimento tipo. Esta tipologia mostra o apartamento típico mais exposto às trocas de calor com o exterior, na medida em que mostra mais fachadas. Contudo, permite também ventilação cruzada. Entretanto, fatores que influenciaram no desempenho da envoltória nas duas zonas bioclimáticas, foram: falta de sombreamento nas janelas, pré-requisitos com relação à área de ventilação não atendidos para todos os ambientes de permanência prolongada, assim como pré-requisitos de iluminação não atendidos para o ambiente da sala de estar. E na ZB8, os pré-requisitos com relação à transmitância e capacidade térmica não foram atendidos nas paredes e na cobertura com alta absorvância solar (0,7).

Por fim, foi realizada uma comparação com o atendimento dos projetos representativos aos requisitos mínimos da norma de desempenho NBR 15575. A Tabela 22 mostra o atendimento aos critérios para paredes, coberturas e área de ventilação nas duas zonas bioclimáticas.

Percebe-se que os projetos representativos atendem a mais critérios da norma do que da Etiqueta de Energia, especialmente em relação à área de ventilação. De forma específica critérios não atendidos no Nível de renda 1 referem-se a:

- Critérios relacionados com a cobertura para todas as tipologias na ZB8;
- Pré-requisito com relação às paredes para a tipologia do edifício;
- Critérios de ventilação no ambiente de sala de estar em todas as tipologias nas duas zonas bioclimáticas;
- Critérios de ventilação no quarto 1 para algumas tipologias na ZB8;

No nível de renda 2 os critérios não atendidos referem-se a:

- Critérios relacionados com a cobertura para as tipologias de edifícios nas duas zonas bioclimáticas.

Tabela 22 – Comparação de atendimento dos projetos representativos com os requisitos mínimos para desempenho térmico da NBR 15575 em relação às paredes, às coberturas e à área de ventilação nos ambientes.

Projeto representativo	Parede		Cobertura		Ventilação nas aberturas					
	ZB 3	ZB 8	ZB 3	ZB 8	ZB3			ZB8		
					SE	Q1	Q2	SE	Q1	Q2
Nível de renda 1										
CT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CG	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
EH	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nível de renda 2										
Edifício Linear										
Ap1	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ap2	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ap3	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Edifício em "H"										
	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input checked="" type="checkbox"/> *	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Notas: = Atende ao critério = Não atende ao critério *Atende ao critério para $\alpha \leq 0,6$. Neste estudo está sendo considerada para ZB8 a região Nordeste.

Parede: [ZB3 e ZB8 se $\alpha \leq 0,6$ então $U \leq 3,7$ E se $\alpha > 0,6$ então $U \leq 2,5$]

[$C_t \geq 130$ para ZB3. ZB8 sem requisitos];

Cobertura: [ZB3 se $\alpha \leq 0,6$ então $U \leq 2,3$ E se $\alpha > 0,6$ então $U \leq 1,5$]

[ZB8 se $\alpha \leq 0,4$ então $U \leq 2,3$ E se $\alpha > 0,4$ então $U \leq 1,5$];

Requisitos de ventilação nas aberturas: [Para ZB3 $A \geq 7\%$] [Para ZB8 (Nordeste) $A \geq 8\%$]

Ressalta-se que as avaliações com relação ao desempenho termoenergético foram realizadas nos projetos representativos, definidos com as características encontradas com maior frequência de ocorrência das amostras analisadas. Dessa forma, projetos específicos ou atendendo a diferentes programas de financiamento do PMCMV podem mostrar desempenhos diferentes.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta primeira etapa foram definidos os projetos representativos de habitações de interesse social construídos na atualidade no país. Neles, foi avaliado seu desempenho termoenergético com relação à Etiqueta de Energia, considerando o método prescritivo, como forma de apresentar o desempenho atual dos projetos que estão sendo construídos no setor de baixa renda. Foram analisados inicialmente 108 projetos para chegar aos projetos representativos estabelecidos em dois níveis de renda. No nível de renda 1, que corresponde à Faixa 1 no PMCMV foram definidas três tipologias como representativas: casa térrea unifamiliar, casa térrea geminada e edifício multifamiliar de quatro ou cinco andares com planta em formato H. No nível de renda 2, que corresponde às Faixas 2 e 3 do PMCMV foram definidas duas tipologias representativas: edifício linear de cinco andares e edifício com planta em formato H de quatro andares. O conhecimento da situação atual do setor de habitações de interesse social é importante também para o estabelecimento de políticas públicas e proposta de melhoria dos projetos que estão sendo construídos. Com base nos resultados alcançados nesta etapa, podem ser ressaltadas as considerações descritas a seguir:

1. O levantamento dos projetos confirmou que no setor de habitações de interesse social no Brasil são usados projetos de edificações muito similares e, por vezes iguais, nas diversas regiões e zonas bioclimáticas, tanto em termos de características morfológicas quanto de materiais.
2. Os projetos representativos de tipologias que estão sendo construídas na atualidade no setor de HIS e, mais especificamente, no PCMV mostraram baixo desempenho termoenergético com relação à Etiqueta de Energia brasileira, em particular no Nível 1 de renda. Para esses projetos, foi notado de forma usual, o não atendimento a pré-requisitos da Etiqueta de Energia com relação à cobertura (transmitância térmica em função da absorvância), à área de ventilação e à área de iluminação nas janelas, em especial, para a zona bioclimática 8 e a zona bioclimática 3 (no ambiente sala de estar). Igualmente, falta de sombreamento nas janelas. Todos esses fatores influenciaram no baixo desempenho termoenergético dos projetos.
3. Os projetos do nível de renda 1 foram avaliados em várias orientações e com diferentes absorvâncias de paredes, alcançando na média final da envoltória níveis que variaram entre C, D e E. Os

resultados mais baixos foram observados na tipologia de casa unifamiliar e nos apartamentos de cobertura dos edifícios multifamiliares, deixando em evidência a importância do desempenho térmico do componente cobertura nos projetos.

4. Os projetos representativos das tipologias do nível de renda 2, embora tenham mostrado desempenho superior ao nível 1, ficaram igualmente com desempenho entre C e E dependendo do tipo de apartamento, posição no edifício e zona bioclimática.

5. Em ambos níveis, os projetos na zona bioclimática 8 mostraram comportamento inferior ao mesmo projeto na zona bioclimática 3, corroborando, assim, a importância de se considerarem medidas bioclimáticas com relação ao contexto para otimização do desempenho. Isso leva a reconsiderar a prática de projetos padrão com soluções similares nas diferentes regiões e escolhidos em função do menor custo inicial. E, ainda mais, o desempenho mais baixo foi observado no verão, o que mostrou um problema por causa da sua importância no país.

6. Com as análises realizadas, foi possível identificar algumas questões relevantes que deveriam ser observadas nos projetos, tais como: melhoria nas questões de ventilação e sombreamento por meio de alterações nas esquadrias, absorvância solar nas paredes e nas coberturas e necessidade de redução da transmitância térmica em coberturas e paredes, entre outras.

7. O desempenho nos apartamentos dos edifícios multifamiliares teve muita influência da posição do apartamento da edificação. Apartamentos no térreo tiveram o melhor desempenho por conta do contato com o solo, enquanto apartamentos na cobertura tiveram o pior desempenho em ambas as zonas.

8. A casa unifamiliar isolada mostrou-se como a tipologia mais presente no país e, comparativamente, como aquela que apresentou desempenho mais baixo quando comparada às outras tipologias e; mais ainda, quando comparada com a tipologia de casa geminada, que tinha características construtivas muito semelhantes. Levantasse, com isso, o questionamento sobre se essa tipologia deve ser a mais presente ainda hoje para o setor de habitação de interesse social. O desempenho mais baixo, é em parte, resultado da maior exposição e troca das fachadas e cobertura com o meio externo, o que resulta em um maior maior ganho térmico decorrente das características e propriedades já descritas nos seus componentes. Contudo, as razões para ser ainda a tipologia mais presente pode

suscitar uma longa discussão que vai muito além de questões de desempenho termoenergético da habitação. Entre elas, o menor custo da estrutura nessa tipologia, custo de terrenos mais baratos nos locais onde são implantadas. Ainda existe maior preferência dos usuários por essa tipologia por conta da maior flexibilidade para aumento de área construída, isenção de custo condominial, autonomia e propriedade de terreno. Questões como essas, entre outras, ocasionam a aceitação de edificações com baixa qualidade termoenergética.

9. Esta etapa mostrou a necessidade de melhoria do desempenho termoenergético dos projetos que estão sendo construídos para o setor de HIS, além da necessidade de uma perspectiva de longo prazo para a priorização dos projetos.

10. Finalmente, o levantamento e avaliação colocou em evidência que as normas e padrões exigidos até o momento são insuficientes para garantir um bom desempenho das habitações. O nível de renda 1, que resultou em desempenho mais baixo é o que representa o maior déficit habitacional. Isto pode sugerir que a inversão nesse setor é insuficiente e que são necessárias metas mais ambiciosas para critérios mínimos de desempenho termoenergético, além dos atualmente aceitos.

Acredita-se que estudos de novas tipologias mais eficientes sejam necessários, considerando uma visão mais holística do uso da energia. No entanto, por ser a tipologia de casa isolada ainda a mais representativa do setor e apresentar o desempenho mais baixo, foi escolhida como estudo de caso para a realização das etapas seguintes propostas nesta pesquisa.

6. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS CONSIDERANDO MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA FASE DE USO DA EDIFICAÇÃO

A segunda etapa deste estudo consistiu na análise na fase de uso, por meio de simulação termoenergética, da incorporação de medidas de adaptação às mudanças climáticas no projeto representativo escolhido na etapa anterior: a casa unifamiliar térrea do nível de renda 1. Nesta etapa e na seguinte as análises foram feitas para duas cidades específicas, São Paulo e Salvador. A cidade de São Paulo, localizada no estado de São Paulo, região Sudeste do Brasil, pertence à ZB3 e apresenta necessidade de resfriamento e aquecimento ao longo do ano. Por outro lado, a cidade de Salvador, no estado da Bahia, que pertence à região Nordeste do país e à ZB8 tem necessidades somente de resfriamento ao longo do ano.

Na simulação termoenergética foi considerado tanto o uso de arquivos climáticos que representam o clima atual, quanto de arquivos climáticos que representam cenários de clima futuro. O foco nas mudanças climáticas foi com relação às alterações que influem no desempenho termoenergético da edificação e no conforto térmico do usuário, considerando os parâmetros do clima que foram alterados nos arquivos climáticos futuros usados para a simulação termoenergética.

A análise foi realizada com duas formas de operação da edificação: uso exclusivo de ventilação natural e o uso de condicionamento ambiental (AVAC) em alguns períodos. Isso tomou como base a metodologia usada para o método de simulação da Etiqueta de Energia. Reconhece-se maior uso potencial da ventilação natural nas habitações de interesse social no Brasil; contudo, a edificação com o uso de AVAC foi colocada como parte da metodologia, de forma a verificar o consumo previsto de condicionamento ambiental, caso fosse usado na edificação, pois verifica-se um incremento atual do seu uso no setor. Igualmente, como forma de ver o impacto que as mudanças climáticas poderiam causar no consumo do mesmo.

Para a avaliação desta etapa, foram escolhidos indicadores que fossem representativos nas questões relacionadas às mudanças climáticas e ao desempenho termoenergético operacional da edificação. Igualmente que estivessem associados às duas formas de operação em que estava sendo avaliada a edificação. Assim, para a edificação com uso de AVAC foram escolhidos como indicadores de avaliação o consumo energético anual e as suas emissões de CO₂ anuais associadas. Para a edificação com uso exclusivo de ventilação natural foram escolhidos indicadores

relacionados ao conforto térmico do usuário. Para isso, foram considerados tanto horas de desconforto para frio e calor, quanto os graus-hora de resfriamento e aquecimento. Os indicadores foram avaliados para os cenários climáticos atual e futuro. Mostram-se neste capítulo, inicialmente os materiais e método utilizados para a realização desta etapa e posteriormente os resultados alcançados.

6.1 MATERIAIS E MÉTODO

O método proposto nesta fase incluiu, em primeiro lugar, a definição dos parâmetros para o modelo de simulação e, em segundo lugar, a definição e a forma de avaliação das medidas de adaptação às mudanças climáticas, por meio dos indicadores considerados para a edificação em uso. Os passos realizados foram os seguintes:

1. Preparação de arquivos climáticos futuros para as cidades selecionadas;
2. Preparação dos dados para simulação do projeto representativo com definição de cargas internas e detalhes construtivos;
3. Definição de medidas isoladas e em conjunto e avaliação do seu grau de efetividade na tipologia analisada; e
4. Avaliação, por meio de indicadores na fase de uso da edificação, considerando cenários climáticos atual e futuros.

6.1.1 Arquivos de previsão de clima futuro para as cidades selecionadas

Conforme a revisão bibliográfica, a sugestão do IPCC com relação aos cenários futuros é que nenhum dos cenários previstos para mudanças climáticas deva ser considerado o melhor e, portanto, vários cenários deveriam ser testados nas avaliações com clima futuro. Isso serve, para garantir que as incertezas estejam sendo cobertas. Contudo, até o momento em que foi elaborado este trabalho, não foi possível o acesso a dados regionais para o Brasil, de forma a estar adaptados para serem usados em simulações termoenergéticas de edificações. Dessa forma, foi adotado nesta pesquisa o uso da ferramenta *CCWorldWeatherGen*, na sua versão 1.8, para a geração de arquivos de climas futuros para as cidades escolhidas, seguindo a metodologia proposta por Jentsch et al. (2013). Para isso, foram usados os arquivos que se encontram disponíveis das

duas cidades em formato TRY. O ano correspondente aos arquivos para as duas cidades se encontra dentro do período de 1961 a 1990, conforme recomendação para o uso da ferramenta. Esses arquivos foram obtidos no *site* do LabEEE (LABEEE, 2015) e convertidos para arquivos de climas representativos dos anos 2020 e 2050. Conforme revisão de literatura, o arquivo de 2020 representa o período de 2011 a 2040, enquanto o arquivo de 2050 representa o período de 2041 a 2070. Com isso, embora o ano de 2011 esteja há poucos anos no passado quando considerado o ano atual, estão sendo representados, de forma aproximada, os 50 anos da vida útil da edificação, conforme expectativa estimada pela NBR 15575. Não foi considerado o período de 2080, também possível de estimar com a ferramenta, já que buscou-se representar somente os 50 anos da vida útil da edificação.

Observa-se que quando foi realizada a conversão do arquivo TRY da cidade de Salvador para arquivos futuros, a ferramenta *CCWorldWeatherGen* apontou inconsistências do arquivo original com relação à radiação global horizontal, que, em algumas horas, se mostrou igual ou excedendo a radiação horizontal extraterrestre calculada, o que poderia indicar que o arquivo seguia a convenção da hora solar no lugar da convenção padrão de tempo usada. Dessa forma, as inconsistências foram corrigidas. A ferramenta *CCWorldWeatherGen* assume dados do modelo HadCM3 no cenário A2, considerados no terceiro e no quarto relatórios do IPCC. Para a estimativa do arquivo climático futuro, são assumidos os dados do IPCC das quatro coordenadas que se encontram mais perto do local escolhido, levando-se em conta a média entre elas. Essas quatro coordenadas para a cidade de São Paulo representam um raio de aproximadamente 250 km. Nesse caso, a maioria dos arquivos climáticos disponíveis nesse raio estão na mesma zona bioclimática 3 em que se encontra a cidade de São Paulo. Para a cidade de Salvador, as coordenadas representam um raio de aproximadamente 320 km e a maioria dos arquivos climáticos disponíveis das cidades que se encontram dentro desse raio estão, assim como em Salvador, localizados na ZB8. Com isso em mente, mesmo sabendo que não estão sendo usados dados regionais para a previsão do clima futuro, leva-se em conta que os arquivos podem ser considerados de um clima previsto representativo para ambas as cidades.

6.1.2 Preparação de dados para simulação termoenergética – Caso base do projeto representativo da casa unifamiliar térrea

O modelo para simulação foi criado a partir do levantamento de informações nacionais de forma a representar características de uma habitação de interesse social do nível de renda 1 no PMCMV. O modelo foi criado usando um *plugin* no programa de simulação *Energy Plus*, o *Legacy Open Studio*, versão 1.0.12, o qual trabalha com o programa *SketchUp 2015*. A simulação termoenergética foi realizada usando o Programa *Energy Plus*, versão 8.2. O programa *Energy Plus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, modela o comportamento e o consumo energético de edifícios multizonas com base no desenho do edifício e em dados climáticos (WANG et al., 2009), além de outros parâmetros. Para tal, permite simulações tanto em edifícios que usam condicionamento artificial quanto naqueles que usam ventilação natural.

Para a simulação, é necessária a definição das zonas térmicas. Dessa forma, quatro zonas térmicas foram criadas: sala de estar (incluindo cozinha), quarto 1, quarto 2 e banheiro, todos com pé-direito de 2,5 m. Uma quinta zona foi criada para a modelagem do ático entre o forro e a cobertura. Para a preparação do modelo a simular, foram definidos os usos finais com padrão de uso ou “cargas internas” do projeto, os materiais com as suas propriedades térmicas, temperatura do solo e parâmetros para simulação com ventilação natural e com uso de AVAC. Esses parâmetros e sua forma de abordagem são descritos a seguir.

6.1.2.1 Caracterização de usos finais e padrão de uso para simulação de habitação de interesse social do PMCMV

Para a definição das cargas internas na simulação do modelo do caso base pensando na vida útil da edificação, foram analisadas cinco referências de abrangência nacional com enfoque no uso da habitação e, quando disponível da habitação de interesse social. Três delas são pesquisas nacionais: Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo - SINPHA (BRASIL; ELETROBRÁS; PROCEL, 2007), Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD (IBGE, 2013) e dados do Censo de 2010. Também foram analisados dados da Etiqueta de Energia e da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (ANEEL, 2015). O objetivo foi criar um

cenário de uso das habitações de interesse social nas regiões Sudeste e Nordeste fundamentado nas referências disponíveis.

Os resultados do SINPHA foram disponibilizados em banco de dados em formato Access e SPSS. Os dados, disponíveis por região, avaliam diversas questões, separadas tanto por tipologias das unidades residenciais (casa, apartamento e outros) quanto por renda familiar em salários mínimos. A partir desses resultados, foram selecionadas as regiões Sudeste e Nordeste, cruzando os dados com a seleção de 1 a 3 salários mínimos e tipologia casa. Foram buscados dados relevantes com relação a cargas internas e ocupação, tais como número de habitantes na unidade, tipo e uso dos equipamentos, eletrodomésticos e iluminação. Os dados relacionados à envoltória foram levantados como forma de comparação com o projeto representativo que estava sendo utilizado. Os resultados obtidos com relação ao consumo de equipamentos foram comparados com referências de estudos nacionais que tomaram como base relatórios do SINPHA. Não obstante, ressalta-se que foi considerado que a pesquisa do SINPHA é de 2007 e, portanto, quando possível, os dados dessa pesquisa foram comparados com dados similares de pesquisas mais recentes.

No PNAD buscaram-se informações com relação a usuários, distribuição dos grupos populacionais, projeções futuras e possíveis dados de uso das habitações. No Censo pesquisaram-se dados complementares que fornecessem informações sobre os usuários, a constituição familiar relevante e o local de trabalho. Na Etiqueta de Energia procuraram-se informações com relação às horas de ocupação dos usuários e às horas de uso de iluminação, quando não foi possível encontrar nas outras fontes. E, de forma semelhante, na ANEEL buscaram-se dados de usos médios de equipamentos para o Brasil, quando não foi possível encontrar nas fontes anteriores. Observa-se que, por questões de simplificação do estudo, não foi considerado o consumo de energia em *stand-by*. Igualmente, a energia usada para cocção não foi considerada nesta análise. Embora as emissões de gás, combustível comumente usado no Brasil para cocção, são maiores do que as de eletricidade na matriz energética, considerando-se o fator de emissão do Sistema Interligado Nacional, o foco recaiu sobre as áreas em que o arquiteto tem maior influência por meio do projeto. Também não foi considerado o aquecimento de água. Entende-se que o mesmo representa um dos principais usos finais de energia elétrica no setor; contudo, o foco do estudo esteve mais centrado na avaliação da envoltória. Entretanto, acredita-se que o uso da energia solar para aquecimento de água,

amplamente divulgada no setor residencial, deve ser considerada cada vez mais nos projetos, em especial na tipologia unifamiliar.

Por outro lado, embora se acredite que os usos finais possam mudar ao longo dos 50 anos da vida útil considerada para a edificação, os usos finais de equipamentos e iluminação foram mantidos constantes nas simulações com os diversos arquivos climáticos. Justifica-se essa escolha porque o estudo esteve mais focado no desempenho da envoltória da edificação e com base em algumas pesquisas, entre elas, Ren, Chen e Wang (2011), que mostraram os usos finais de equipamentos e iluminação não apresentando muita sensibilidade ao aquecimento global, sendo dominantes os usos finais de condicionamento ambiental como refrigeração e aquecimento.

Também, acredita-se que o comportamento do usuário possa ter influência importante no desempenho da edificação em uso, assim como a ocupação dos usuários pode ter variações ao longo da vida útil da edificação. Entretanto, com base na revisão da literatura e considerando o recorte dado à pesquisa como forma de explicitar mais a influência do projeto e, em especial, da envoltória no comportamento termoenergético da edificação com relação às mudanças climáticas, o comportamento e o número de usuários foram mantidos constantes para toda a vida útil da edificação.

Dessa forma, os dados levantados do PNAD mostraram tendências como o envelhecimento da população, a diminuição do número de habitantes por habitação, diversas configurações das famílias e algumas posses de equipamentos principais, tais como televisão, computador e máquina de lavar roupas. Considerando-se os dados do PNAD e do Censo, foi possível observar que, embora o número de pessoas com idade mais avançada tenda a aumentar, para 2060 a maioria das pessoas ainda estarão em idade produtiva de trabalho. E, atualmente, para as pessoas mais novas, a grande maioria está na escola e/ou trabalhando. Dessa forma, pode ser considerado que, atualmente e em um futuro até 2060, ainda será maior o número de pessoas que ficarão fora de casa a maior parte do dia.

No SINPHA os dados analisados deram informações com relação à posse de equipamentos por região. Considerando o recorte de 1 a 3 salários mínimos e a tipologia casa, a amostra no Sudeste foi de 549 habitações, enquanto a do Nordeste foi de 500 habitações. No entanto, observou-se que a casa unifamiliar representou a maior tipologia dentro da amostra total do SINPHA para as duas regiões. Portanto, considera-se que os dados aqui levantados de uso e posse de equipamentos da casa

poderiam ser extrapolados para as outras tipologias do Nível 1 de renda. Nos dados com relação à envoltória das habitações foram encontradas diferenças entre a tipologia de casa do SINPHA e o projeto representativo aqui adotado para a casa unifamiliar térrea. As mesmas referem-se, em especial, ao uso do forro e do revestimento das paredes. No levantamento do SINPHA a maioria das casas não apresentava forro e as paredes tinha reboco somente na área externa. Por outro lado, coloca-se como limitações aos dados analisados do SINPHA a impossibilidade de identificar a quantidade de horas com relação aos usos dos equipamentos denominados na pesquisa como “grande, médio, regular e pequeno”. A análise dos dados do SINPHA mostrou na região Sudeste, a maioria das casas com área de até 50m², enquanto, para a região Nordeste, era entre 51 e 75 m². E, para ambas as regiões a maior parte das casas tinha consumo de energia elétrica entre 51 e 100 kWh/mês. Dados sobre equipamentos mostraram como usos principais uma geladeira de 240 L e uma televisão de 20’. Entretanto, o uso do ventilador e do circulador de ar apresentou pouca posse e pouco uso no Sudeste, enquanto uma posse de 50% no Nordeste com uso regular. Com relação ao ar-condicionado foi observado que não foi comum o seu uso para ambas as regiões. Contudo, quando usado, a potência mais frequente era de 7.500 BTU, porém sem identificação de padrão de uso. Outros equipamentos como o aparelho de som tiveram proporção de posse similar entre quem usa e quem não usa, assim como o ferro, que apresentou um uso médio em ambas as regiões. O computador não representou alta posse de uso nas duas regiões. Com relação à máquina de lavar roupas, foi observado que apresentou pouca posse no Nordeste, enquanto no Sudeste foi de quase 50%. Para o uso final de iluminação, a maior frequência de ocorrência foi para a lâmpada incandescente de 60W para ambas as regiões, embora o uso de lâmpadas fluorescentes tenha sido mais observado no Nordeste, sendo tipicamente de 15 W ou mais. E, apesar de não estar sendo considerado no estudo o aquecimento de água, foram levantadas as características do mesmo para comparação com os usos finais propostos em outras pesquisas nacionais. Assim, observou-se que o uso do aquecimento de água, principalmente por meio do chuveiro elétrico, apresentou posse elevada no Sudeste, presente em 96% das habitações da região, principalmente com o uso de chuveiro elétrico e, principalmente na posição de uso para verão. No Nordeste 53% das famílias não usavam aquecimento de água, porém, para as que usavam, era também por meio do chuveiro elétrico com a posição de uso principalmente para inverno. Com relação ao consumo do chuveiro, a ANEEL estima que a potência

do chuveiro elétrico na posição de inverno varia entre 4.500 W e 6.000 W, enquanto na posição de verão varia entre 2.100 W e 3.500 W. Finalmente, para as duas regiões, o tempo de uso do chuveiro elétrico era geralmente de até 10 minutos. Assim, na análise do SINPHA, foram encontradas diferenças significativas entre as duas regiões nos usos finais do ventilador e circulador, iluminação e água quente, assim como na quantidade média de pessoas por habitação.

Com base nos resultados analisados das pesquisas, foi assumido neste estudo para a iluminação o uso de lâmpadas fluorescentes compactas de 15 W para todos os ambientes em ambas as regiões, considerando-se assim o uso de seis lâmpadas (três na sala de estar/cozinha, uma em cada quarto e uma no banheiro). Isso, devido à redução de preços desse tipo de lâmpada, à facilidade de acesso e a iniciativas do governo com relação à troca de lâmpadas incandescentes por fluorescentes. Leva-se em conta que o uso da tecnologia LED para iluminação pode entrar de forma mais forte nas habitações do setor de baixa renda no país, mas essa é uma previsão que fica fora do escopo desta pesquisa. O uso do ventilador e do circulador foi maior no Nordeste do que no Sudeste. Contudo, devido ao uso desse equipamento poder ser considerado mais uma medida de melhoria para conforto do que uma carga fixa interna, não foi considerado para as simulações. O aquecimento de água mostrou presença elevada na região Sudeste e perto de 50% de posse na região Nordeste. Contudo, políticas recentes do PMCMV estão colocando o uso do aquecimento solar no Nordeste, por isso ele está aumentando entre os usuários do setor de baixa renda. Como consequência disso, acredita-se que os usuários optem por maior conforto nos próximos anos e, portanto, aumente consideravelmente o uso de água quente na região Nordeste. Sendo assim, para o consumo de água quente, o período de uso estimado nas duas regiões foi de oito minutos por pessoa por dia considerando um chuveiro elétrico com potência de 4.025 W, o que representa a potência média para o equipamento levando em conta o uso observado para verão e inverno conforme a ANEEL (2011).

Para os outros equipamentos, o consumo do refrigerador nas simulações foi estimado como de um aparelho eficiente com nível A no INMETRO. A televisão foi assumida como de 29", devido à facilidade de acesso hoje em dia a esse equipamento e ao preço mais baixo. O aparelho de som e o ferro de passar roupa foram assumidos com base nos dados do SINPHA. E, ainda mais, as simulações consideraram o uso do computador com base nas informações do PNAD, pois se acredita que a inclusão desse equipamento será cada vez maior no futuro no setor que

está sendo analisado. Da mesma forma, foi adotado o uso da máquina de lavar roupas com consumo de 0,35 kWh por ciclo (aproximadamente 1h15min) usando água fria com dois ciclos por semana.

Observou-se que há diferenças significativas entre as regiões para alguns usos finais. No entanto, acredita-se que no futuro a maior parte dessas diferenças tenda a desaparecer na busca por habitações mais confortáveis e pelo aumento da renda familiar. Portanto, foi assumida a mesma posse, o uso de equipamentos e iluminação para o caso base nas duas cidades analisadas. Da mesma forma, isto permite comparações mais diretas entre as cidades. Assim, a Tabela 23 mostra o consumo elétrico estimado para o caso base como sendo de 136,65 kWh/mês, sem considerar o uso do condicionamento de ar. Vale ressaltar que as porcentagens dos usos finais são diferentes das encontradas nas pesquisas nacionais com base no SINPHA 2007 por conta de considerar-se nesta pesquisa equipamentos como geladeira e iluminação mais eficientes. Isso fez com que o uso final de aquecimento de água tenha maior preponderância, além do fato de estarem sendo considerados usos finais iguais em ambas cidades conforme explicado anteriormente.

Tabela 23 – Consumo estimado de energia elétrica para o caso base nas duas cidades.

Usos finais	Consumo (kWh/mês)	Potência kW	Uso (horas/dia)	Dias no mês	Uso (horas/mês)
Iluminação	9,42				
Geladeira	24,0	0,0333	24	30	
Chuveiro elétrico	64,00	4,025	0,53	30	
Televisão	12,75	0,085	5	30	
Aparelho de som	4,8	0,08	3	20	
Computador	8,91	0,135	3	22	
Ferro	10	1			10
Máquina de lavar roupas	2,8	0,28			10
Consumo total	136,65				

Fedriço et al. (2009) consideraram, no seu estudo com base na informação do SINPHA de 2007, um consumo elétrico de 75,55 kWh/mês para a região Nordeste e de 144,53 kWh/mês para a região Sudeste, com os mesmos usos finais que estão sendo assumidos nesta pesquisa. Por outro lado, Tavares (2006) estimou, com base no SINPHA de 2004, uma média nacional de 140 kWh/mês de consumo de energia elétrica para o

setor de habitações entre um e três salários mínimos. Dessa forma, o consumo estimado para a simulação do projeto representativo de habitação unifamiliar do Nível 1 pode ser considerado em acordo com pesquisas nacionais.

Padrões de ocupação para o caso base foram inicialmente obtidos da Etiqueta de Energia e, posteriormente, da análise dos dados do PNAD, com adaptação ao projeto representativo proposto. Diferente do que é considerado na Etiqueta de Energia foi estimada carga de ocupação e iluminação também para o ambiente do banheiro e para o ambiente da cozinha em alguns horários da manhã. Com relação ao número de pessoas na habitação, foram observadas diferenças entre as duas regiões analisadas. Para o Nordeste, as referências estudadas indicaram uma tendência de quatro pessoas por habitação, enquanto para o Sudeste de três pessoas. Entretanto, e embora reconhecendo essa diferença optou-se por considerar quatro usuários, novamente para permitir no estudo comparações mais diretas entre as duas cidades. O padrão de ocupação mostra que ao menos um dos ocupantes está na habitação no período da tarde durante a semana. Na sala de sala de estar que está integrada com a cozinha, todas as pessoas estão sendo consideradas com atividade metabólica de 108W, embora a Etiqueta de Energia recomenda que uma pessoa na cozinha seja considerada com atividade metabólica maior. A Tabela 24 mostra a atividade metabólica adotada para os usuários. Os padrões de iluminação e ocupação para ambas as regiões são mostrados nas Figuras 44 e 45.

Tabela 24 – Atividade metabólica para os usuários e número de usuários nos diferentes ambientes do caso base.

Ambiente	Pessoas		Atividade	Nível de atividade	
	SE	NE		(W/m ²)	(W)
Sala de estar	4	4	Sentado ou vendo televisão	60	108
Quarto 1	2	2	Descansando ou dormindo	45	81
Quarto 2	2	2	Descansando ou dormindo	45	81
Banheiro	1	1	Sentado	60	108

Nota: SE=Sudeste e NE=Nordeste.

Figura 44 – Padrões de iluminação e para ambas as regiões.

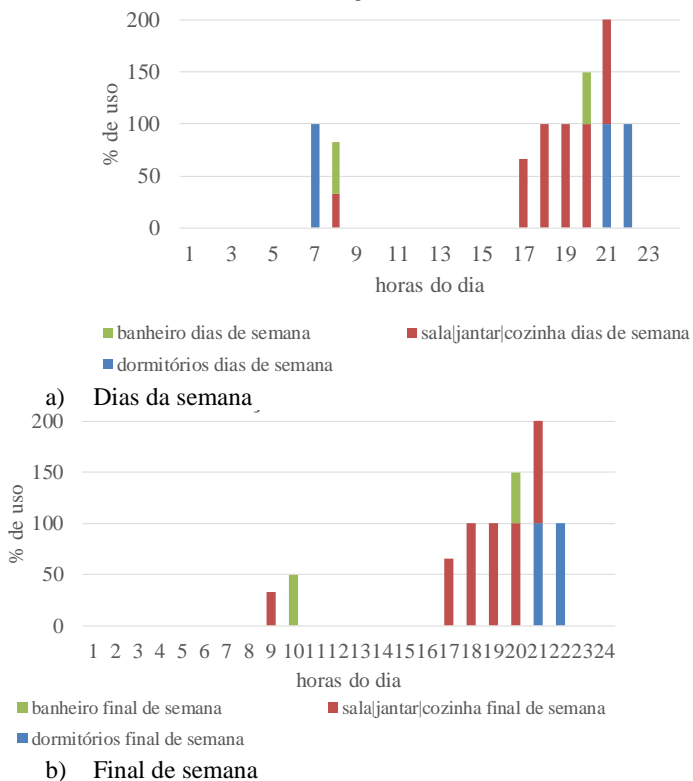


Figura 45– Padrões de ocupação para ambas as regiões.

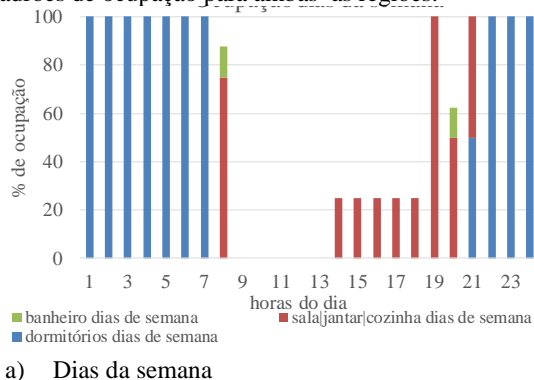
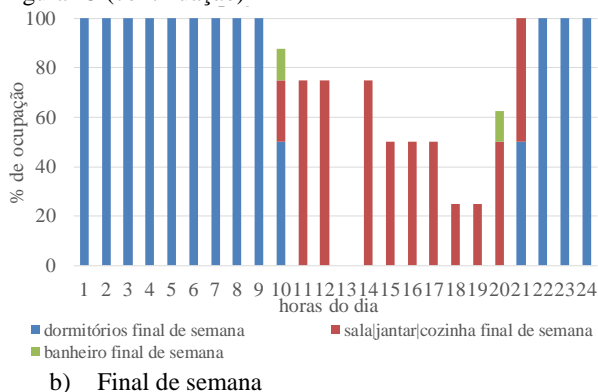


Figura 45 (continuação)



6.1.2.2 Materiais

As propriedades térmicas dos componentes da envoltória do caso base foram aquelas descritas do projeto representativo no capítulo 5 desta pesquisa. As propriedades térmicas dos materiais do caso base e dos casos com medidas de adaptação, tais como densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico, foram tomadas da NBR 15220, Parte 2 (ABNT, 2005c). Para a condutividade térmica e a densidade de massa aparente, foram adotados valores médios quando necessário; e, a transmitância e a capacidade térmica dos componentes da envoltória foram calculadas conforme a metodologia da NBR 15220, Parte 2 (ABNT, 2005c). Igualmente, foi realizada a equivalência dos materiais para densidade e espessura quando necessário, como no caso da alvenaria com tijolo furado, em que as camadas de tijolo foram calculadas conforme método proposto por Ordenes et al. (2003). O mesmo procedimento foi adotado para o forro de PVC e outros materiais das medidas adotadas, quando necessário. As propriedades térmicas dos materiais usados no caso base estão descritas na Tabela 25 e das medidas de adaptação estão exibidas na Tabela 26.

Tabela 25 – Propriedades térmicas dos materiais usados nas simulações da casa unifamiliar térrea – Caso base.

Material	Espessura equivalente [cm]	Condutividade [W/mK]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]	Absortância
Tijolo 6 furos 9x14x19cm	2,07*	0,90	1.427,57*	920	0,7
Junta de argamassa	1,30	1,15	1.950	1.000	0,7
Reboco	2,00	1,15	1.950	1.000	0,6
Piso cerâmico	1,00	1,05	1.900	920	0,4
Argamassa regularização piso	2,00	1,15	1.950	1.000	0,7
Laje em concreto para piso	5,00	1,75	2.300	1.000	0,7
Brita para piso	3,00	0,70	1.250	800	0,8
Telha cerâmica	1,00	1,05	1.900	920	0,6
Material	Espessura equivalente [cm]	Condutividade [W/mK]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]	Absortância
Forro em PVC	2,83*	0,20	96,61*	960	0,3
Porta em madeira	0,50	0,23	675	1.340	0,7
Porta metálica (aço)	0,20	55	7.800	460	0,6
Camâras de ar					Resistência térmica [m ² K/W]
Câmara de ar superfície de alta emissividade, espessura > 5 cm – fluxo horizontal					0,17
Câmara de ar superfície de alta emissividade, espessura 2 a 5 cm – fluxo horizontal (usada em parede)					0,16
Câmara de ar superfície de alta emissividade, espessura 1 a 2 cm – fluxo horizontal (usada em portas)					0,14

Nota: *Valores de densidade de massa aparente e espessura equivalente para simulação. Fonte: NBR 15220, Parte 2 (ABNT, 2005c).

Tabela 26 – Propriedades térmicas dos materiais usados nos casos com medidas de adaptação.

Material	Espessura equivalente [cm]	Condu-tividade [W/mK]	Densidade equiva-lente [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]	Absortân-cia solar
Painel de madeira pinus/ eucalipto/ nativas	2,2	0,15	510	1.340	0,6
Tijolo 8 furos 11x19x19 cm	3,65	0,9	816,14	920	0,7
Telha de barro cor clara	1,0	1,05	1.900	920	0,5
Tijolo 9 furos 14x19x19 cm	7,99	0,9	453,05	920	0,7
Telha metálica branca	0,6	55	7.800	460	0,3
Material	Espessura equivalente [cm]	Condu-tividade [W/mK]	Densidade equiva-lente [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]	Absortân-cia solar
EPS para laje em concreto com EPS	0,8	0,04	1.675,5	1.420	0,2
Concreto para laje com EPS	4,0	1,75	2.300	1.000	0,7
Argamassa para laje em concreto com EPS	1,0	1,15	1.950	1.000	0,7
Forro em madeira	1,0	0,15	510	1340	0,3
Parede em concreto 10 cm	10	1,75	2.300	1.000	0,6
Câmara de ar Materiais isolantes					Resistência térmica [m ² K/W]
Câmara de ar de fluxo descendente com alta emissividade > 5cm					0,21
Lã de rocha de 2,5 cm					0,55
Lã de rocha de 5,0 cm					1,111
Lã de rocha de 7,0 cm					1,84

Fonte: NBR 15220, Parte 2 (ABNT, 2005c).

6.1.2.3 Parâmetros para simulação com relação à operação da edificação

Os mesmos parâmetros para simulação foram considerados para as duas cidades para que poder ser realizadas comparações de forma direta. As simulações foram feitas com duas formas de operação, primeiro com uso exclusivo de ventilação natural e, posteriormente, com uso de condicionamento ambiental (AVAC) e ventilação natural. O método da simulação tomou como base a metodologia da Etiqueta de Energia (RTQ-R); entretanto, com algumas alterações. A seguir colocam-se os parâmetros considerados nas duas abordagens das simulações destacando-se diferenças em relação ao método da Etiqueta de Energia.

6.1.2.3.1 Simulação com ventilação natural

As simulações para ventilação natural foram realizadas usando o objeto *airflow network* do *Energy Plus*. Para o coeficiente de pressão do vento, foi usado o cálculo médio da superfície, que é um método simplificado estimado por meio da média das superfícies e pode ser usado devido às características do caso base com relação à sua volumetria. A ventilação foi definida como acontecendo 24 horas ao longo de todo o ano, sendo o modo de controle da ventilação nas zonas estabelecido por temperatura considerando o *setpoint* de 20°C¹⁷. Igualmente, foi definido o grau de abertura das janelas e das portas. As portas externas foram consideradas sempre fechadas e as portas internas sempre abertas com um fator de abertura de 100%. Os fatores de ventilação, ou seja, porcentagem de abertura das janelas seguiram o estimado no projeto representativo. O projeto foi modelado considerando o contexto de cidade no *Energy Plus*. O controle usado da rede de ventilação natural foi multizona sem distribuição (*multizone without distribution*).

6.1.2.3.2 Simulação com ar-condicionado e ventilação natural

A simulação com ar-condicionado foi usada para verificar o consumo de energia, que pode ser previsto caso seja usado o condicionamento ambiental. Foi modelada usando o objeto *Packaged*

¹⁷ No controle por temperatura a abertura da janela se dá “quando a temperatura do ar do ambiente é igual ou superior à temperatura do termostato, e também quando a temperatura do ar do ambiente é superior à temperatura externa” (BRASIL, 2012).

Terminal Heat Pump, disponível no *Energy Plus*. Porém, diferente da Etiqueta de Energia em que somente os quartos são simulados com o uso de sistema de condicionamento ambiental, nesta proposta foram modelados os quartos e a sala de estar/cozinha. Dessa forma, considera-se ter um valor de consumo previsto da habitação.

O sistema de condicionamento nos ambientes foi ligado a um termostato, porém com valores adotados diferentes aos usados na Etiqueta de Energia. Para aquecimento, o termostato foi de 19,5 °C, com base em De Vecchi et al. (2014). Para o resfriamento, com base em Sorgato (2015), o termostato para todos os dias do ano variou, fazendo uso da função de timer existente atualmente nos aparelhos condicionadores de ar. Dessa forma considerou-se um termostato a 24°C entre 7h e 24h e 25°C durante a madrugada, das 24h até 7h. O horário de uso do sistema de condicionamento ambiental seguiu o padrão de ocupação dos ambientes, isto é, entrava em funcionamento quando tinha pessoas no ambiente. Algumas características do sistema foram a taxa de suprimento de fluxo de ar para refrigeração e aquecimento auto-ajustável e a taxa de fluxo de ar externa por pessoa de 0,00944 m³/s. Diferentemente da Etiqueta de Energia, o coeficiente de desempenho (COP) do sistema de refrigeração e aquecimento foi considerado igual para que seja possível ter o mesmo peso na avaliação da necessidade tanto de refrigeração quanto de aquecimento. O COP estabelecido foi de 3,24 W/W, considerado nível de eficiência A no INMETRO. Embora se considere que deva ter mudança do COP ao longo do ciclo de vida da edificação, o mesmo foi mantido constante nas simulações com todos os cenários climáticos. Isso deve-se tanto a não terem sido encontradas pesquisas que abordem o tema em profundidade e possam ser usadas como fundamento para alternativas de mudança do COP no futuro, quanto como forma de enfatizar a importância da influência da envoltória com as alterações previstas no clima. Nas simulações que consideraram a operação com AVAC, a ventilação natural nos ambientes foi usada no período oposto ao uso do condicionamento ambiental. Assim, os outros parâmetros de ventilação natural descritos no item anterior foram mantidos.

6.1.2.3.3 Parâmetros para temperaturas do solo na simulação

Especialmente para tipologias térreas, e devido às edificações no Brasil não serem isoladas no piso, a interação entre o piso e o solo com relação às trocas de calor é muito importante para a temperatura interna resultante do ambiente. Devido à inércia do solo, a temperatura nele se mantém constante e mais baixa do que a temperatura do ar, de forma que

influencia na manutenção de temperaturas mais confortáveis na habitação. Portanto, para levar em consideração as temperaturas do solo no modelo do caso base foi usado o novo objeto disponível na versão 8.2 do *Energy Plus*, que integra o modelo de temperatura do solo acoplada ao piso da edificação por meio do *Ground Domain Slab*. Esse modelo integra as temperaturas do solo no arquivo climático dentro do arquivo idf sem o uso de programas externos, como era necessário em versões anteriores do *Energy Plus*. Dados com relação ao modelo e parâmetros que usa encontram-se disponíveis no manual do *Energy Plus*. Para a laje de piso, foi determinada como *on grade*; e o *Slab Boundary Condition Model* usado foi o *Ground Couple OSCM*. Optou-se por não calcular os valores médios do solo de Kusuda–Achenbach com relação à temperatura e à amplitude. Assim, foram usados valores mensais de temperatura do solo que se encontram no arquivo climático, opção dada pelo *Energy Plus*. Os valores adotados da temperatura do solo foram os correspondentes à profundidade de 2m por considerar-se temperaturas com menor amplitude do que as de profundidade 0,5m. Esses dados foram colocados no objeto *Ground Temperature Shallow*. Essa foi a opção assumida neste estudo. Para isso, e seguindo as recomendações do manual do *Energy Plus*, na superfície do piso a condição de limite externo foi optada como sendo *Other Side Conditions Model* e o objeto *Outside Boundary Condition Object* como sendo *Ground couple OSCM*. Ainda mais, alguns valores padrão dados pelo Programa para o objeto *Ground Domain Slab* foram adaptados de forma a considerar uma condição mais adequada ao contexto.

Para a comprovação da validade da nova ferramenta nas simulações, foi realizado um teste para comparação dos resultados da temperatura operativa mensal nas quatro zonas (sala de estar, quartos e banheiro) do caso base. Primeiro com o uso do pré-processador *slab* conforme procedimento realizado em versões anteriores do programa *Energy Plus*, e, posteriormente, com o uso do objeto *Ground Domain Slab*, integrado na simulação, conforme descrito aqui. Nas versões anteriores o pré-processador *slab* deveria ser rodado por três vezes até se obterem valores estáveis de temperatura operativa mensal que considerassem as interações entre a edificação e a temperatura do solo. Foram adotadas as mesmas temperaturas do solo nos dois casos. Com os dados de temperatura operativa das zonas, foi obtida uma média ponderada por área dos ambientes, considerando-se um valor único para a edificação por mês. A variação entre os valores finais de temperatura operativa da habitação, obtidos com o pré-processador *slab*, e os

resultados obtidos pelo objeto *Ground Domain Slab* foram menores do que 0,2°C em todos os meses, sendo na maioria dos meses ao redor de 0,1°C, consequentemente mostrando a validade do uso do *slab* integrado no arquivo idf do *Energy Plus*.

6.1.3 Definição de medidas de adaptação avaliadas

Os critérios com relação ao desempenho termoenergético de edifícios residenciais, incluídos nas referências nacionais como a etiqueta de Energia e o Selo Casa Azul e, ainda, no Projeto SUSHI, abarcam a integração com a vegetação, a relação com o entorno, a flexibilidade no projeto e estratégias bioclimáticas passivas com relação ao desempenho térmico da envoltória. Dessa forma, de acordo com a revisão de literatura, e, ainda em parte fundamentado no terceiro relatório do Projeto SUSHI (UNEP, 2010b), foi estabelecida uma Tabela (Apêndice B¹⁸) com medidas para adaptação dos projetos de HIS às mudanças climáticas, com foco nas alterações que influem no desempenho termoenergético da edificação. De forma similar à revisão de literatura, foi considerada a divisão em critérios e subcritérios. No total foram estimadas 33 medidas agrupadas em:

- melhoria do desempenho térmico:
 - melhoria do desempenho térmico da envoltória,
 - redução da radiação direta no verão,
 - melhoria da ventilação, e
 - redução do efeito de ilha de calor;
- redução no consumo de energia através de fontes alternativas de energia;
- redução no consumo de energia através de equipamentos eficientes;
- flexibilidade;
- condicionamento artificial; e
- redução ao risco de inundação (edificações sem contato com o solo).

Salienta-se que, embora o foco da pesquisa seja adaptação às mudanças climáticas do ponto de vista da influência no desempenho termoenergético da edificação, foi elencado um item possível com relação ao risco de inundação. Essa medida considera edificações que não estariam em contato direto com o solo, que na tipologia de habitações térreas, pode ter grande influência no desempenho.

¹⁸ O Apêndice B mostra a tabela com as medidas de adaptação elencadas.

Para as medidas, foram levantados, inicialmente e de forma qualitativa, alguns benefícios potenciais e desafios de maneira que considerassem o ciclo de vida da edificação e as variáveis abordadas no estudo. Assim, o **Apêndice B** mostra as medidas, considerando benefícios potenciais para redução de energia e emissões de CO₂ na fase de uso, assim como melhoria do conforto térmico. Igualmente, foram elencados alguns potenciais desafios com relação a custos e energia incorporada, bem como consideradas possíveis mudanças no projeto. Para todas as medidas foi dada uma qualificação entre baixa, média e alta a todos os indicadores, sendo feita uma divisão entre custos iniciais e de operação.

A revisão de literatura mostrou que as pesquisas que se propõem a avaliar influências das mudanças climáticas no comportamento termoenergético dos projetos têm um foco maior em medidas com relação à envoltória. Na pesquisa, portanto, o foco do estudo foi para medidas relacionadas à envoltória. Para isso, foram escolhidas para avaliação as medidas que, conforme a análise qualitativa inicial exibida no Apêndice B, proporcionaram maior benefício potencial com relação ao conforto do usuário com menor custo. Foi considerado ainda, os resultados mostrados na etapa 1 desta pesquisa, que apontaram algumas medidas necessárias de serem incorporadas no projeto representativo da casa unifamiliar. Assim, são levantadas aqui as medidas que foram analisadas nesta etapa e sua forma de abordagem.

Melhoria do desempenho térmico da envoltória: para este item foram abordadas opções com relação a tipos de paredes, cobertura e forro, considerando componentes com maior resistência térmica, diferentes absorvâncias e uso de isolantes. Igualmente, foi testada a opção da mudança na orientação para avaliar o posicionamento dos ambientes e as esquadrias com relação a quatro orientações. De forma geral, buscou-se avaliar paredes com maior resistência térmica que considerassem opções com várias alternativas de capacidade térmica, tanto alta quanto baixa. Para isso propuseram-se mudança de material, uso de câmara de ar e uso de isolantes¹⁹. Ao todo, foram testadas oito opções de paredes externas.

¹⁹ O uso de isolantes coloca-se na literatura como uma das medidas para se obter melhoria no desempenho termoenergético das edificações, em especial para países de clima frio. Desta forma queria ser evidenciado o seu grau de efetividade para as duas zonas bioclimáticas, tanto no componente cobertura quanto nas paredes. Esta consideração foi feita embora ainda não seja considerado uma

A parede identificada como PAR 0 de alvenaria com bloco de tijolo de seis furos e largura total de 13 cm foi a parede do caso base. Por outro lado, a PAR 7, que é uma parede em concreto de 10 cm, pôde ser considerada também como uma prática atual. O caso base foi testado também com relação a várias absorvâncias nas paredes externas.

As medidas avaliadas para a cobertura incluíram mudança no material, uso de absorvâncias mais baixas e uso de isolante considerando diferentes espessuras. A mudança com relação ao forro foi analisada de forma separada para se ter a real percepção da influência de cada componente no caso base. Foram estimados dois tipos de coberturas: telha de barro com duas absorvâncias (α), considerando a telha de barro natural cor avermelhada com α 0,6 e a telha de barro natural cor creme com α 0,5. A cobertura com telha metálica foi estimada com uma única absorvância solar, sendo de 0,3 que corresponde a uma cor branca. A telha de barro do caso base considera absorvância 0,6, considerada mas comumente usada.

Redução da radiação direta no verão: com relação a este critério, o caso base foi analisado com duas opções: o uso de venezianas²⁰ exclusivamente nos quartos e em todos os cômodos de permanência prolongada (quartos e sala de estar com cozinha). Esta medida se limitou a estratégia de sombreamento sem considerar a opção de vidros com melhor desempenho, por considerar-se a primeira opção mais usual no contexto das habitações no setor.

Melhoria da ventilação: foram avaliadas duas medidas:

a) aumento do fator de ventilação nas janelas dos ambientes de maior ocupação (sala de estar/cozinha e quartos). Com isso, o fator de ventilação passou de 45% para 90%; e

b) aumento do tamanho das janelas: inicialmente, para alcançar o requerido pela NBR 15575 e, posteriormente, para ter aumento de 20%

prática atual no setor residencial no Brasil, em especial de baixa renda, sendo mais usual o seu uso somente nas coberturas.

²⁰ Para a opção com o uso de venezianas foi considerado na simulação o tipo de sombreamento *exterior blind* com a opção *on if high outdoor air temperature and high solar on window* disponível no *Energy Plus*; adotado para acontecer com setpoint de 25 °C e radiação solar de 95 W/m² na janela. Para a escolha do *setpoint* considerou-se 1°C abaixo da temperatura estabelecida para conforto. Além disso, a opção com baixa radiação solar na janela procurou testar a utilização de um sombreamento efetivo.

do tamanho da janela com relação ao tamanho inicial. Igualmente, as medidas para melhoria da ventilação foram avaliadas simultaneamente.

Risco de inundação: finalmente, foi avaliada a opção de a edificação estar a 0,60 m da terra sem contato com o solo, para verificar mudanças no desempenho térmico da edificação.

As medidas definidas para adaptação às mudanças climáticas foram avaliadas em primeiro lugar, por meio de análises isoladas. Isso possibilitou a avaliação de muitas medidas em um curto espaço de tempo, permitindo assim ver os efeitos de cada medida no desempenho geral da edificação na sua fase de uso. Em um segundo momento, foram avaliadas algumas medidas em conjunto, sendo privilegiadas, de forma geral, as medidas que apresentaram bom desempenho de forma isolada, com algumas exceções, explicitadas mais adiante. As simulações isoladas e em conjunto foram realizadas com o uso do programa *JePlus* versão 1.5.1. O sucesso com o uso desse programa para simulações paramétricas foi provado por Zhang (2009) e Zhang e Korolija (2010). Todas as medidas foram avaliadas para as duas formas de operação da edificação e nos três cenários climáticos definidos nas duas cidades.

6.1.3.1 Análises das medidas isoladas

O projeto representativo foi simulado primeiramente nas quatro orientações. A orientação com o desempenho mais baixo em relação aos indicadores avaliados nas duas cidades, foi assumida para o caso base nas simulações isoladas. Considerou-se que benefícios alcançados nessa orientação seriam incrementados nas outras orientações que obtivessem melhor desempenho. A Tabela 27 mostra cada uma das medidas avaliadas de forma isolada, sua identificação e, quando relevante, as propriedades térmicas dos componentes. Em vermelho, mostra-se o que foi avaliado diferente com relação ao caso base. Características do caso base são identificadas como CB. Para as esquadrias, foram avaliadas algumas medidas diferentes no caso de São Paulo e Salvador.

Tabela 27 – Descrição, identificação e propriedades térmicas das medidas avaliadas de forma isolada para as duas cidades.

Nº caso	ORIENTAÇÃO		
AZ0	Caso base com orientação azimute 0°		
AZ90	Caso base com orientação azimute 90°		
AZ180 (CB)	Caso base com orientação azimute 180° (escolhido para caso base das análises isoladas)		
AZ270	Caso base com orientação azimute 270°		
Nº caso	ABSORTÂNCIA SOLAR DAS PAREDES EXTERNAS		
ABS0,2	Caso base com absorptância solar das paredes externas 0,2		
ABS0,3	Caso base com absorptância solar das paredes externas 0,3		
ABS0,4	Caso base com absorptância solar das paredes externas 0,4		
ABS0,5	Caso base com absorptância solar das paredes externas 0,5		
ABS0,6 (CB)	Absortância solar das paredes externas 0,6		
ABS0,7	Caso base com absorptância solar das paredes externas 0,7		
Nº caso	ALVENARIA	U W/(m².K)	Ct kJ/(m².K)
PAR0 (CB)	Alvenaria em tijolo 13cm_tijolo 6 furos de 9x14x19cm +reboco interno e externo 2cm	2,43	132
PAR1	Alvenaria em tijolo duplo 25cm _ tijolo 6 furos de 9x14x19cm + câmara de ar de 3cm + reboco interno e externo de 2cm	1,24	174
PAR2	Alvenaria em tijolo 15cm_tijolo 8 furos de 11x19x19cm +reboco interno e externo 2cm	2,24	133
PAR3	Alvenaria em tijolo 18cm_tijolo 9 furos de 14x19x19cm+reboco interno e externo 2cm	1,84	145
PAR4	Parede dupla de madeira _em chapa de madeira plantada de 2,2cm com câmara de ar de 5cm	1,60	30
PAR5	Parede dupla de madeira com isolante _em chapa de madeira plantada de 2,2cm+ isolante lã de rocha 5cm	0,64	34
PAR6	Alvenaria em tijolo 15,5cm com isolante _tijolo 6 furos de 9x14x19cm +isolante lã de rocha 2,5cm no lado externo+reboco interno e externo 2cm	0,99	135
PAR7	Parede em concreto _10cm	4,40	230
PAR8	Parede concreto com isolante _parede em concreto 10cm+isolante em lã de rocha 2,5cm + reboco externo 2cm	1,24	281

Tabela 27 (continuação)

Nº caso	COBERTURAS (todas considerando forro de PVC)		U W/(m².K)	Ct kJ/(m².K)
COB0 (CB)	Telha de barro cor natural (α 0,6)		1,75	21,4
COB1	Telha de barro cor natural (α 0,6) + isolante lã de rocha 2,5cm		0,89	22,17
COB2	Telha de barro cor natural (α 0,6) + isolante lã de rocha 5cm		0,59	23,86
COB3	Telha de barro cor natural (α 0,6) + isolante lã de rocha 7cm		0,41	25,21
COB4	Telha de barro cor clara (α 0,5)		1,75	21,4
COB5	Telha de barro cor clara (α 0,5) + isolante lã de rocha 2,5cm		0,89	22,17
COB6	Telha de barro cor clara (α 0,5) + isolante lã de rocha 5cm		0,59	23,86
COB7	Telha de barro cor clara (α 0,5) + isolante lã de rocha 7cm		0,41	25,21
COB8	Cobertura telha metálica (α 0,3)		1,78	24,53
COB9	Cobertura telha metálica (α 0,3) + isolante lã de rocha 2,5cm		0,90	26,22
COB10	Cobertura telha metálica (α 0,3) + isolante lã de rocha 5cm		0,60	27,90
COB11	Cobertura telha metálica (α 0,3) + isolante lã de rocha 7cm		0,42	29,25
Nº caso	FORROS			
FOR0 (CB)	Forro em PVC 1cm			
FOR1	Forro em madeira 1cm			
FOR2	Laje mista em concreto com EPS_12 cm			
Nº caso	ESQUADRIAS			
ESQ0_SP e SAL (CB)	Caso base sem venezianas – Fator de ventilação (FV) 0,45	SALA DE ESTAR QUARTOS: esquadria 1,50x1,00 m. FV 0,45/correr / sem veneziana		
		COZINHA: esquadria 1,20x1,00 m. FV 0,45/correr/ sem veneziana		
		BANHEIRO: esquadria. 0,80x0,60 m. FV 0,90/basculante / sem veneziana		
ESQ1_SP e SAL	Venezianas nos quartos	SALA DE ESTAR: esquadria 1,50x1,00 m. FV 0,45/correr / sem veneziana		
		QUARTOS: esquadria 1,50x1,00 m. FV 0,45/correr /com veneziana		
		COZINHA: esquadria 1,20x1,00 m. FV 0,45/correr/ sem veneziana		
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,60 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana		

Tabela 27 (continuação)

Nº caso	ESQUADRIAS	
ESQ2_SP e SAL	Venezianas nos quartos e sala de estar/cozinha	SALA DE ESTAR QUARTOS: esquadria 1,50x1,00 m. FV 0,45/correr / com veneziana
		COZINHA: esquadria 1,20x1,00 m. FV 0,45/correr/ com veneziana
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,60 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana
ESQ3_SP e SAL	Todas as janelas com FV 0,90	SALA DE ESTAR QUARTOS: esquadria 1,50x1,00 m. FV 0,90 /correr / sem veneziana
		COZINHA: esquadria 1,20x1,00 m. FV 0,90/correr/ sem veneziana
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,60 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana
ESQ4_SP	Todas as janelas mais altas (em 0,20m a verga passa de 2,10m para 2,30m)	SALA DE ESTAR QUARTOS: esquadria 1,50x1,20 m. FV 0,45/correr / sem veneziana (Janela mais alta)
		COZINHA: esquadria 1,20x1,20 m. FV 0,45/correr/ sem veneziana (Janela mais alta)
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana (Janela mais alta)
ESQ4_SAL	Peitoril da sala de estar/cozinha menor (passou de 1,10 m para 0,80 m)	SALA DE ESTAR: esquadria 1,50x1,30 m. Peitoril 0,80m (Janela mais baixa) FV 0,45/correr / sem veneziana
		QUARTOS: esquadria 1,50x1,00 m. FV 0,45/correr / sem veneziana
		COZINHA: esquadria 1,20x1,30 m. Peitoril 0,80 m (Janela mais baixa). FV 0,45/ correr/ sem veneziana
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,60 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana
ESQ5_SP	Todas janelas mais altas (em 0,20m a verga passa de 2,10m para 2,30m)+FV 0,90 para todas as janelas	SALA DE ESTAR QUARTOS: esquadria 1,50x1,20 m. FV 0,90/correr / sem veneziana (Janela mais alta+FV)
		COZINHA: esquadria 1,20x1,20 m. FV 0,90/correr/ sem veneziana (Janela mais alta +FV)
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana (Janela mais alta)

Tabela 27 (continuação)

Nº caso	ESQUADRIAS	
ESQ5_SAL	Peitoril da sala de estar/cozinha menor (passou de 1,0m para 0,80 m) + FV 0,90 em todas as janelas	SALA DE ESTAR: esquadria 1,50x1,30 m. Peitoril 0,80m (Janela mais baixa) FV 0,90 /correr / sem veneziana
		QUARTOS: esquadria 1,50x1,00 m.FV 0,90 /correr / sem veneziana
		COZINHA: esquadria 1,20x1,30 m. FV 0,90/ correr/ sem veneziana
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,60 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana
ESQ6_SAL	Todas as janelas mais altas (em 0,20m a verga passa de 2,10m para 2,30m)	SALA DE ESTAR QUARTOS: esquadria 1,50x1,20 m. FV 0,45/correr / sem veneziana (Janela mais alta)
		COZINHA: esquadria 1,20x1,20 m. FV 0,45/ correr/ sem veneziana (Janela mais alta)
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana (Janela mais alta)
ESQ7_SAL	Todas janelas mais altas (em 0,20m a verga passa de 2,10m para 2,30m) + todas com FV 0,90	SALA DE ESTAR QUARTOS: esquadria 1,50x1,20 m. FV 0,90/correr / sem veneziana (Janela mais alta +FV)
		COZINHA: esquadria 1,20x1,20 m. FV 0,90/ correr/ sem veneziana (Janela mais alta+FV)
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana (Janela mais alta)
ESQ8_SAL	Todas as janelas mais altas (em 0,20 m a verga passa de 2,10m para 2,30m) + peitoril menor (de 0,80m) para janelas do sala de estar/cozinha. FV continua 0,45	SALA DE ESTAR: esquadria 1,50x1,40 m. Peitoril 0,80m (Peitoril menor+Janela mais alta) FV 0,45/correr / sem veneziana
		QUARTOS: esquadria 1,50x1,20 m. FV 0,45/correr / sem veneziana (Janela mais alta)
		COZINHA: esquadria 1,20x1,40 m. Peitoril 0,80 m. FV 0,45/ correr/ sem veneziana (Peitorio menor+Janela mais alta)
		BANHEIRO: esquadria. 0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana (Janela mais alta)

Tabela 27 (continuação)

Nº caso	ESQUADRIAS	
ESQ9_SAL	Todas as janelas mais altas (em 0,20 m a verga passa de 2,10 m para 2,30 m) + peitoril menor (de 0,80 m) para janelas da sala de estar/cozinha. FV 0,90	SALA DE ESTAR: esquadria 1,50x1,40 m. Peitoril 0,80m (peitorio menor+Janela mais alta+ FV) FV 0,90/correr / sem veneziana
		QUARTOS: esquadria 1,50x1,20 m. FV 0,90/correr / sem veneziana (Janela mais alta+FV)
		COZINHA: esquadria 1,20x1,2 0m. Peitoril 0,80m. FV 0,90/ correr/ sem veneziana (Peitoril menor+Janela mais alta+FV)
		BWC: esquadria.0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante/sem veneziana (Janela + alta)
Nº Caso	EDIFICAÇÃO EM CONTATO COM O SOLO	
CS (CB)	Edificação em contato com o solo (CB)	
SemCS	Edificação a 0,60cm do chão	

Nota: O caso base é identificado como CB; SP = São Paulo; SAL = Salvador. Identifica medidas aplicadas para a habitação somente em uma das cidades.

A Figura 46 mostra de forma ilustrada as medidas que foram avaliadas de forma isolada.

Figura 46 - Medidas de adaptação avaliadas de forma isolada.



Para a cidade de São Paulo, foram realizadas 216 simulações nesta fase. Para a cidade de Salvador, foram realizadas 240 simulações, ou seja um total de 456 simulações, considerando-se os três cenários climáticos e as duas formas de operação da edificação. Após a análise das medidas

de forma isolada foram analisadas conforme colocado anteriormente algumas medidas em conjunto, as quais são descritas em maior detalhe.

6.1.3.2 Medidas combinadas e análise do grau de efetividade

Para a simulação das medidas combinadas ou em conjunto, foram escolhidas aquelas que alcançaram melhor desempenho com relação ao caso base nas simulações isoladas ou que representaram desempenho médio de um grupo. Igualmente, foram escolhidas algumas medidas que, embora não tivessem o melhor desempenho nos indicadores avaliados, representavam uma medida importante a ser explorada na última etapa da pesquisa junto a outros indicadores, como, por exemplo, energia incorporada e análise econômica. A combinação de medidas isoladas pode mudar as propriedades térmicas dos componentes da envoltória. Por exemplo, no caso das coberturas foram avaliadas como medidas em conjunto a cobertura COB 6 e COB 10 considerando os três tipos de forro, PVC, madeira e laje com EPS. A Tabela 28 mostra as propriedades térmicas calculadas das diferentes coberturas analisadas considerando forro em PVC (Tabela 28a), forro em laje com EPS (Tabela 28b) e forro com madeira (Tabela 28c). Também é identificada de forma gráfica, a mudança no tipo de telha, forro e adoção ou não de isolamento.

Tabela 28a – Propriedades térmicas das coberturas analisadas com forro em PVC.









	Telha	Forro	Descrição componente	U	Ct
COB 0			Telha de barro + câmara de ar+ forro em PVC (caso base)	1,75	21,4
COB 6			Telha de barro + lâ de rocha 5,0cm+ câmara de ar+ forro PVC	0,59	23,86
	Com isolante				
COB 10			Telha metálica + lâ de rocha 5,0cm+ câmara de ar + forro em PVC	0,60	27,90
	Com isolante				

Tabela 28b - Propriedades térmicas das coberturas analisadas com forro em laje com EPS.








Telha	Forro	Descrição componente	U	Ct
 Com isolante		Telha de barro + lâ de rocha 5,0cm+ câmara de ar+ forro laje concreto c/ EPS	0,56	151
 Com isolante		Telha metálica + lâ de rocha 5,0cm+ câmara de ar + forro laje concreto c/ EPS	0,57	155

Tabela 28c - Propriedades térmicas das coberturas analisadas com forro em madeira.

Telha	Forro	Descrição componente	U	Ct
 Com isolante		Telha de barro + lâ de rocha 5,0cm+ câmara de ar + forro de madeira	0,62	28
 Com isolante		Telha metálica + lâ de rocha 5,0cm+ câmara de ar + forro de madeira	0,63	32

A melhor orientação foi escolhida como uma das medidas adotadas. Dessa forma, para todas as simulações das medidas em conjunto, foi usada a orientação que apresentou o melhor desempenho nos indicadores considerados para avaliação nas duas cidades. Estes indicadores serão descritos no próximo item. Para a cidade de São Paulo, foram analisadas 287 combinações de medidas, o que representou um conjunto de 1.722 casos simulados nesta fase. Para a cidade de Salvador, foi analisado um conjunto de 47 combinações de medidas, sendo 282

simulações no total para essa cidade. Ao todo, foram contabilizados nesta fase 2.004 casos simulados considerando as duas cidades, as duas formas de operação e os três cenários climáticos. Assim, levando em conta o todas as simulações (de medidas isoladas e em conjunto), obteve-se um total de 2.460 simulações feitas nesta etapa da pesquisa. A Tabela 29 mostra as variáveis consideradas nas simulações nesta etapa.

Tabela 29 – Variáveis consideradas nas simulações da Etapa 2.

Medidas avaliadas para adaptação às mudanças climáticas	Total de 2.460 simulações
Modo de operação	Ventilação natural AVAC + ventilação natural
Cenários climáticos	Clima atual 2020 2050
Tipologia	Habitação unifamiliar do Nível 1
Cidades	São Paulo Salvador

6.1.4 Indicadores para avaliação: consumo energético, emissões de CO₂ e conforto térmico na fase operacional da edificação

São descritos os indicadores usados para avaliação da edificação na fase de uso operacional. Foram definidos indicadores considerados relevantes para avaliação do desempenho termoenergético da edificação frente à influência das mudanças climáticas. Desta forma, os indicadores avaliados nesta etapa foram: 1) consumo energético anual previsto; 2) emissões de CO₂ associadas previstas para a edificação com o uso do AVAC; 3) indicadores relacionados ao conforto térmico do usuário, tanto considerando horas de desconforto por frio e calor quanto graus-hora para resfriamento e aquecimento. Os resultados foram apresentados para o caso base e os casos com medidas de adaptação nos cenários climáticos atual, 2020 e 2050. Os resultados dos indicadores foram mostrados de forma gráfica e comparativa com relação ao caso base.

6.1.4.1 Consumo energético anual previsto

A simulação termoenergética com o uso de condicionamento ambiental forneceu os dados para o consumo que poderia ser previsto caso fosse usado sistema de AVAC na edificação. A energia operacional considerou a energia prevista com condicionamento ambiental, equipamentos e iluminação. O consumo com condicionamento ambiental incluiu refrigeração para ambas cidades, e refrigeração e aquecimento

para São Paulo. O consumo com AVAC para a unidade habitacional considerou a soma dos consumos na sala de estar e nos quartos. Os dados foram analisados nesta etapa da pesquisa, de forma anual, para os três cenários climáticos nas duas cidades, em kWh/ano e kWh/(m²/ano).

6.1.4.2 Emissões de CO₂ anuais previstas

Conforme a revisão de literatura, um dos grandes impactos relacionados às mudanças climáticas e ao uso da energia na operação das edificações são as emissões de gases de efeito estufa, em especial, as emissões de CO₂ e CO₂ eq, resultantes do consumo energético. Por conta de encontrar-se mais dados no Brasil com relação às emissões de CO₂ do que às emissões de CO₂ equivalente, o mesmo foi adotado como indicador de avaliação nesta etapa. As emissões de CO₂ foram calculadas para o uso previsto de condicionamento ambiental, equipamentos e iluminação. Como observado na revisão de literatura, acredita-se que haja muitas incertezas para o cálculo de emissões futuras, estando a estimativa de fatores de emissão futura fora do escopo desta pesquisa. Desta forma, considerou-se mais adequado o uso de um fator de emissão que englobasse a previsão futura, mesmo para o cenário climático atual, em virtude de buscar-se uma comparação direta entre todos os cenários climáticos, sem considerar o fator de emissão de CO₂ como uma variável. Foi decidido empregar para todos os cenários climáticos o fator de emissão previsto para a energia elétrica pelo PNE 2030, por ser um documento oficial do governo que considera uma estimativa futura. Foi considerado o fator médio entre os quatro cenários propostos no documento, sendo de 0,156 kgCO₂/kWh. Foi usado o mesmo fator de emissão de CO₂ nos três cenários climáticos para comparações mais diretas. Nesta etapa foi adotado o cálculo das emissões, para cada cenário climático considerando as emissões anuais, conforme a Equação 1:

$$Em_{op} = ((E_{ca} + E_{op\ outros}) \cdot FE) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Em_{op} = Emissões de energia operacional em kgCO₂ anual;

E_{ca} = Consumo anual previsto com condicionamento ambiental em kWh/ano;

$E_{op\ outros}$ = Consumo anual para equipamentos e iluminação em kWh/ano; e

FE = Fator de emissão em kgCO₂/kWh.

Os resultados das emissões anuais por cenário climático foram expressos em kgCO₂/ano e kgCO₂/(m²/ano), identificados como

$Em_{opatual}$, Em_{op2020} e Em_{op2050} considerando as emissões para o cenário climático atual, 2020 e 2050 respectivamente.

6.1.4.3 Indicadores relacionados ao conforto térmico do usuário

Para a avaliação dos indicadores relacionados ao conforto térmico do usuário foram considerados os resultados das simulações com o uso exclusivo de ventilação natural. Foi observada na revisão de literatura o uso extensivo do modelo adaptativo da ASHRAE 55 para a avaliação de conforto térmico em edifícios naturalmente ventilados, embora com poucas pesquisas, como a de Peeters et al. (2009) em edifícios residenciais. No Brasil não existe atualmente uma norma de conforto para a avaliação de edifícios residenciais. A avaliação do desempenho para verão da Etiqueta de Energia para edificações residenciais no país é realizada atualmente por meio do indicador de graus-hora de resfriamento. Este indicador embora mostre características de desempenho térmico da edificação, pode ser relacionado ao conforto térmico do usuário na medida em que avalia a habitação com o uso de ventilação natural e usa como parâmetro de avaliação a temperatura operativa. O método adaptativo da ASHRAE 55 também considera para a sua avaliação a temperatura operativa. Portanto, para a avaliação de conforto térmico dos usuários da edificação com uso exclusivo de ventilação natural, foram usados inicialmente, no caso base os dois indicadores: horas de desconforto com o uso do modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 e graus-hora para resfriamento e aquecimento. Posteriormente, para avaliação das medidas de adaptação, foi usado o indicador que se considerou mais conveniente para essa análise. A seguir indicam-se os parâmetros considerados para cada avaliação.

As horas de desconforto foram avaliadas com o método adaptativo proposto pela ASHRAE 55, de 2013, que considera a temperatura operativa do ambiente com relação à temperatura externa predominante. A temperatura média externa predominante ($T_{pma_{(out)}}$) foi usada para estabelecer os limites de 80% e 90% de aceitabilidade. O cálculo da $T_{pma_{(out)}}$ para os diferentes climas foi realizado seguindo o método da ASHRAE 55, de 2013. E com base em De Vecchi et al. (2014), para o cálculo da $T_{pma_{(out)}}$ inicialmente foi usada a temperatura média externa mensal para cada mês e, em seguida, o método dos pesos considerando os últimos sete dias conforme equação de De Dear (2011), que tomou como base a ASHRAE 55 (Equação 2).

$$tpma_{(out)} = 0,34t_{e(d-1)} + 0,23 t_{e(d-2)} + 0,16 t_{e(d-3)} + 0,11t_{e(d-4)} + 0,08 t_{e(d-5)} + 0,05t_{e(d-6)} + 0,03t_{e(d-7)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$tpma_{(out)}$ = Temperatura média predominante do ar externo (°C); e
 $t_{e(d-x)}$ = Temperatura média externa do x dia anterior (°C).

Foi realizada nesta pesquisa uma análise comparativa inicial considerando os dois métodos. Os resultados em ambas as cidades mostraram diferenças menores do que 10%. Como resultado, foi adotado o uso das médias mensais de temperatura para o cálculo da $Tpma_{(out)}$. A avaliação considerou horas de desconforto por calor com aceitabilidade de 80% e de frio por meio de uma base fixa de temperatura em 19,5°C, também conforme De Vecchi et al. (2014). O limite superior de aceitabilidade de 80% foi calculado com base na Equação 3 e o limite inferior de aceitabilidade de 80% estimado em 19,5°C.

$$\text{Limite superior de 80\% de aceitabilidade (°C)} = 0,31 tpma_{(out)} + 21,3 \quad \text{Equação 3}$$

O número de horas excedidas (EH), ou horas de desconforto, foi calculado por meio da Equação 4, conforme o projeto de norma brasileira de conforto térmico de Lamberts et al. (2013):

$$EH = \sum (H > L_{sup} + H < L_{inf}) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$H > L_{sup} = 1$, se a temperatura operativa for maior que a temperatura do limite superior da zona de conforto; e, 0 se o oposto ocorrer;

$H > \text{limite inferior} = 1$, se a temperatura operativa for inferior à temperatura do limite inferior da zona de conforto térmico; e, 0 se o oposto ocorrer.

As horas de desconforto foram calculadas para cada ambiente de permanência prolongada considerando somente as horas ocupadas. Posteriormente, buscou-se um único indicador para a habitação. Para isso foi realizada uma comparação entre dar pesos iguais por ambiente e considerar uma ponderação por área entre os ambientes. Observou-se que as diferenças não eram significativas entre as duas abordagens. Portanto, optou-se por manter a ponderação por área. É feita uma ressalva com relação aos limites para a aplicação da metodologia da ASHRAE 55 tanto com relação aos usuários estarem fora da taxa de metabolismo quanto nas

condições de clo limite considerando os usuários dos quartos. Porém, foi considerada esta norma por falta de outra norma aplicável.

O indicador de graus-hora foi considerado para resfriamento e aquecimento. Para resfriamento, foi considerada a temperatura limite de 26°C com base na Etiqueta de Energia. Para os graus-hora de aquecimento, foi considerada a temperatura de 19,5°C, de forma a estar coerente com a avaliação por horas de desconforto para aquecimento e com o parâmetro adotado na simulação. Foram considerados os mesmos limites para as duas cidades para poder ser realizadas comparações de forma direta entre elas. Os graus-hora foram obtidos para cada hora do ano e estimados, de forma anual com relação à temperatura operativa dos principais ambientes de ocupação (sala de estar/cozinha e quartos) seguindo a metodologia da Etiqueta de Energia. Por fim, uma ponderação que considerou as áreas dos ambientes foi realizada, para obter um único valor por indicador por caso avaliado em cada cenário climático. Como resultado dos indicadores avaliados nesta etapa, obtiveram-se indicadores anuais para os três cenários climáticos (atual, 2020 e 2050) com relação ao desempenho no verão (consumo de refrigeração, emissões de CO₂ por conta da refrigeração, horas de desconforto por calor e graus-hora de resfriamento) e indicadores para o período de inverno na cidade de São Paulo (consumo de aquecimento, emissões de CO₂ por causa do aquecimento, horas de desconforto por frio e graus-hora de aquecimento). Os resultados foram mostrados tanto para cada indicador quanto para todos os indicadores juntos em um gráfico de aranha. Para visualização dos indicadores em conjunto, adotou-se um processo de normalização interna, devido aos indicadores estarem em diferentes unidades. Os resultados são mostrados para cada cenário climático. A normalização interna considerou para os casos avaliados os resultados dos limites mínimos e máximos obtidos para cada indicador nos três cenários climáticos para dessa forma incorporar as mudanças climáticas, conforme a Equação 5.

$VN(x) = (x - \text{Min}) / (\text{Max} - \text{Min})$, tal que VN encontra-se entre [0,1]
Equação 5

Onde:

VN = Valor normalizado em cada cenário climático;

x = Resultado do indicador a ser normalizado em cada cenário climático

Min = Valor mínimo observado nos resultados do indicador considerando os três cenários climáticos;

Max = Valor máximo observado nos resultados do indicador considerando os três cenários climáticos.

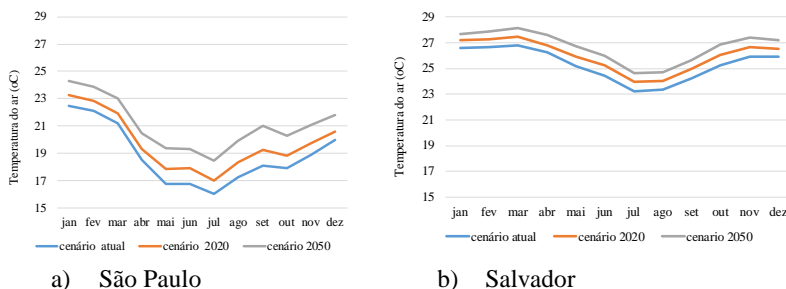
6.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados nesta etapa são mostrados com relação aos arquivos climáticos atual e futuros e à avaliação por meio dos indicadores selecionados considerando a adaptação de medidas de eficiência energética frente às mudanças climáticas para o caso base, casos com medidas isoladas e os casos com medidas em conjunto. Os resultados são apresentados de forma separada para as duas cidades analisadas.

6.2.1 Arquivos climáticos futuros

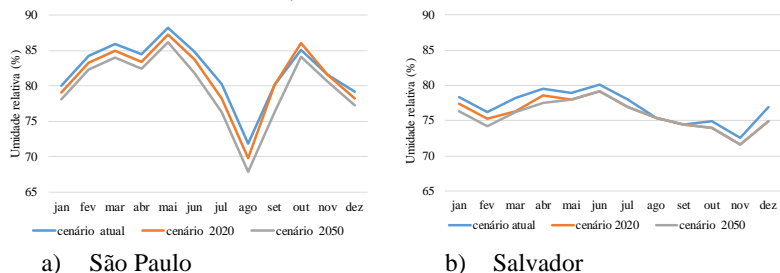
Conforme revisão de literatura, a conversão dos arquivos climáticos obtidos com o *CCWorldWeatherGen* considera alterações em várias variáveis climáticas do arquivo original. As figuras a seguir mostram a comparação nos arquivos climáticos atual, cenário de 2020 e 2050 para ambas as cidades, para as variáveis climáticas de temperatura do ar, radiação global horizontal e ventos. A Figura 47 mostra a temperatura média do ar mensal para São Paulo e Salvador considerando o cenário climático atual (convenção dada na tese para o arquivo TRY inicial conforme descrição no item 6.1.1) e os anos 2020 e 2050. Pode ser observado que em São Paulo as temperaturas médias mostraram uma tendência de aumento em 2°C e até 3°C em alguns meses, especialmente entre maio e setembro, quando comparados os dados do cenário climático atual com as projeções para 2050. Para Salvador, as mudanças foram mais constantes ao longo do ano e o aumento de temperaturas médias foi de aproximadamente 2°C, considerando o cenário climático atual e 2050.

Figura 47 – Temperaturas médias mensais para São Paulo (a) e Salvador (b) considerando o cenário climático atual, e as previsões para 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3



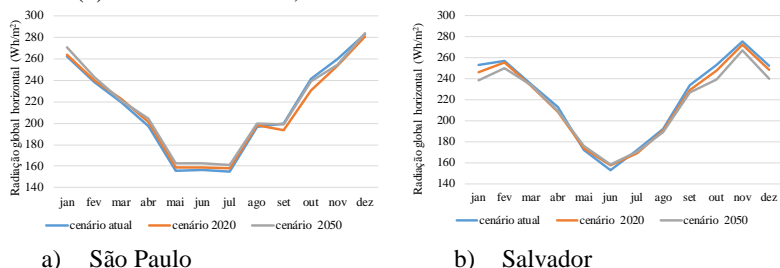
A Figura 48 mostra comparação entre os diferentes cenários para a umidade relativa nas duas cidades. Como esperado com o aumento gradual das temperaturas nos cenários climáticos futuros, teve redução na umidade relativa. Para São Paulo a média anual considerando o cenário atual e 2050, mostrou redução de 2,4%, enquanto para Salvador 1,3%.

Figura 48– Umidade relativa média mensal para São Paulo (a) e Salvador (b) considerando os cenários atual, 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3



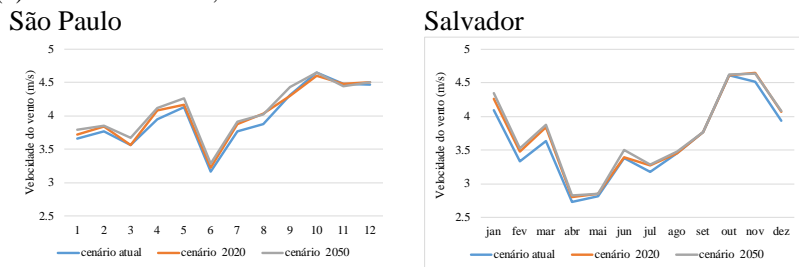
A Figura 49 apresenta a média mensal da radiação global horizontal para São Paulo e Salvador nos três cenários climáticos. Considerando-se a média anual nos três cenários, o arquivo climático da cidade de São Paulo mostra um aumento de 3,13 Wh/m² enquanto o da cidade de Salvador mostrou uma redução de 5,24 Wh/m².

Figura 49 – Radiação global horizontal média mensal para São Paulo (a) e Salvador (b) nos cenários atual, 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3



A Figura 50 apresenta a média mensal da velocidade do vento para São Paulo e Salvador nos três cenários climáticos. Foi observado um aumento na média anual da velocidade dos ventos para os cenários futuros, entretanto não significativo. A média anual da velocidade do vento teve um aumento para 2050 de 0,1 m/s para ambas as cidades comparado ao cenário atual.

Figura 50 – Velocidade do vento média mensal para São Paulo (a) e Salvador (b) nos cenários atual, 2020 e 2050 do cenário A2 no modelo HadCM3



Finalmente, a Tabela 30 e a Tabela 31 mostram as temperaturas do solo para todos os meses do ano junto às temperaturas médias mensais, para os três cenários climáticos, nas cidades de São Paulo e Salvador, respectivamente.

Tabela 30 – Médias mensais de temperatura exterior e temperatura do solo para a cidade de São Paulo nos três cenários climáticos analisados (em °C)

	São Paulo					
	1963		2020		2050	
Meses	Temp. Média	Temp. Solo	Temp. Média	Temp. Solo	Temp. Média	Temp. Solo
Jan	22,47	19,64	23,27	20,54	24,33	21,82
Fev	22,13	20,55	22,82	21,37	23,85	22,60
Mar	21,18	20,97	21,91	21,79	23,01	23,99
Abr	18,51	20,96	19,31	21,68	20,45	22,89
Mai	16,74	20,22	17,89	21,04	19,35	22,29
Jun	16,76	19,18	17,95	20,06	19,29	21,37
Jul	16,05	18,08	17,03	19,99	18,49	20,36
Ago	17,23	17,15	18,35	18,11	19,90	19,54
Set	18,13	16,69	19,26	17,68	21,02	19,14
Out	17,91	16,81	18,82	17,82	20,29	19,26
Nov	18,88	17,48	19,75	18,46	21,06	19,87
Dez	20,00	18,50	20,58	19,46	21,79	20,80

Tabela 31 – Médias mensais de temperatura exterior e temperatura do solo para a cidade de Salvador nos três cenários climáticos analisados (em oC)

Salvador TRY						
	1963		2020		2050	
Meses	Temp. Média	Temp. Solo	Temp. Média	Temp. Solo	Temp. Média	Temp. Solo
Janeiro	26,57	25,76	27,20	26,46	27,70	27,15
Fevereiro	26,67	26,26	27,29	26,94	27,86	27,62
Março	26,79	26,50	27,50	27,17	28,13	27,85
Abril	26,23	26,50	26,80	27,11	27,61	27,79
Maiο	25,20	26,08	25,92	26,75	26,71	27,43
Junho	24,41	25,50	25,21	26,19	25,98	26,88
Julho	23,21	24,89	23,98	25,58	24,65	26,28
Agosto	23,37	24,37	24,00	25,09	24,67	25,79
Setembro	24,21	24,11	24,97	24,85	25,62	25,55
Outubro	25,26	24,18	26,08	24,92	26,88	25,62
Novembro	25,88	24,56	26,64	25,29	27,38	26,99
Dezembro	25,90	25,12	26,54	25,85	27,18	26,54

6.2.2 Medidas para adaptação às mudanças climáticas

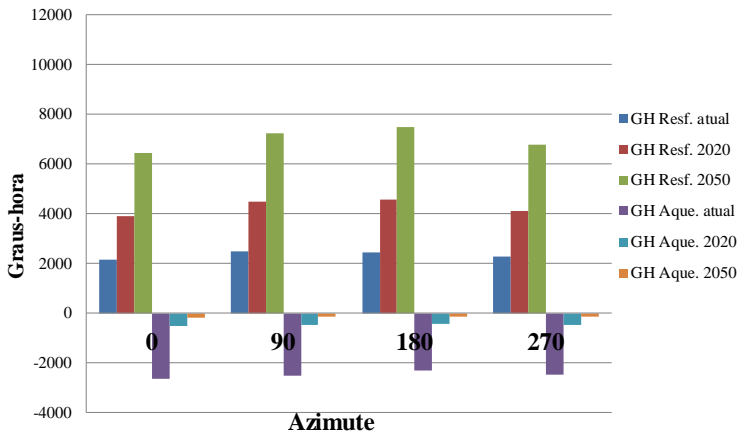
A Figura 51 representa o modelo de simulação no *Energy Plus* do projeto representativo da tipologia de habitação unifamiliar térrea analisado nas cidades de São Paulo e Salvador.

Figura 51 – Modelo de simulação da tipologia unifamiliar térrea – caso base para São Paulo e Salvador.

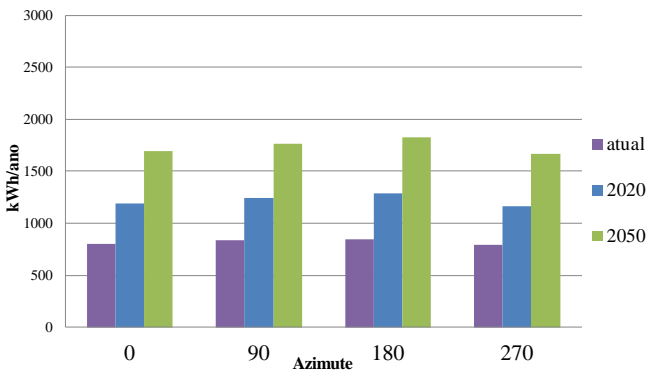


Os resultados do caso base com relação à avaliação nas quatro orientações para as duas cidades são mostrados nas Figuras 52 e 53 considerando a média ponderada por ambiente. Estes resultados determinaram a orientação a ser adotada nas análises posteriores. A Figura 52a mostra os resultados para São Paulo com relação aos graus-hora para resfriamento e aquecimento nos três cenários climáticos. A Figura 52b mostra os resultados para a mesma cidade com relação ao consumo de resfriamento e aquecimento previsto anual. A Figura 53a e b mostra os mesmos resultados para Salvador, respectivamente.

Figura 52 – Resultados por orientação para caso base em São Paulo por cenário climático.

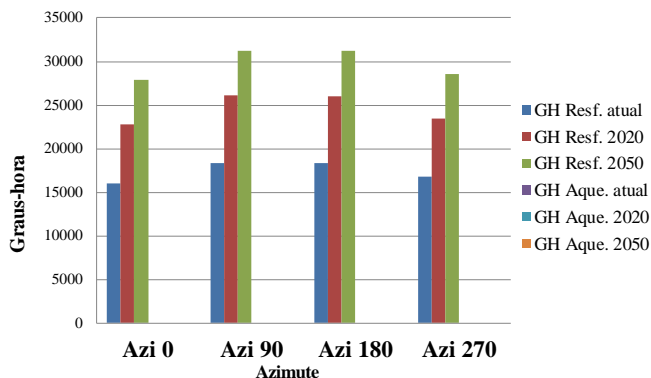


a) Graus-hora para resfriamento e aquecimento

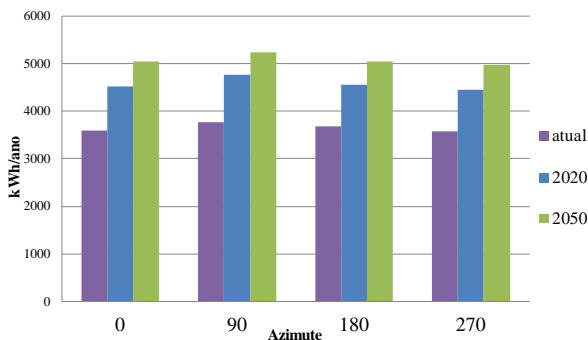


b) Consumo anual previsto para resfriamento e aquecimento

Figura 53 – Resultados por orientação para o caso base em Salvador por cenário climático.



(a) Graus-hora para resfriamento e aquecimento

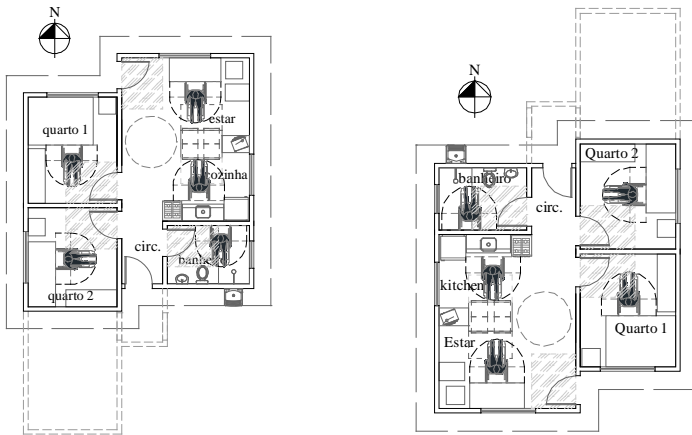


(b) Consumo anual previsto para resfriamento e aquecimento

O aumento nos indicadores tanto de graus-hora de resfriamento quanto de consumo previsto para refrigeração, assim como a redução com relação aos indicadores de aquecimento para o caso base em São Paulo era esperado frente ao cenário de mudanças climáticas observado nos arquivos climáticos futuros. Com relação às orientações foram observadas diferenças para ambos indicadores, sendo mais notórias para a edificação com ventilação natural em relação ao graus-hora de resfriamento. De forma geral, e considerado os indicadores analisados, a edificação com azimuth 180° mostra um baixo desempenho em ambas as cidades, enquanto a edificação com azimuth 0° tem melhor desempenho igualmente em ambas as cidades, sendo particularmente melhor com relação aos graus-hora de resfriamento, ou seja, para a operação com o uso exclusivo de ventilação natural. Por conta desse resultado, para o caso

base e as medidas de adaptação analisadas de forma isolada foi considerado para as duas cidades a edificação na orientação de azimute 180° conforme Figura 54a, pois foi assumido que melhorias observadas com a incorporação das medidas avaliadas nessa orientação tendem a incrementar-se em outras orientações. Para análises das medidas de adaptação em conjunto, o caso base teve a orientação também no azimute 180° , entretanto para os casos com medidas de adaptação (em conjunto) foi considerada a orientação com azimute 0° , adotando-se a orientação já como uma medida de adaptação para ambas as cidades (Figura 54b).

Figura 54 – Situação do Norte considerado para o caso base conforme análise realizada.



a) Para análise das medidas de adaptação isoladas (azimute 180°)

b) Para análises das medidas de adaptação em conjunto (azimute 0°)

Os resultados a seguir são apresentados por cidade, primeiro para São Paulo e logo após para Salvador. Mostram a avaliação por meio de simulação computacional do caso base, das medidas para adaptação avaliadas de forma isolada e das medidas para adaptação avaliadas em conjunto.

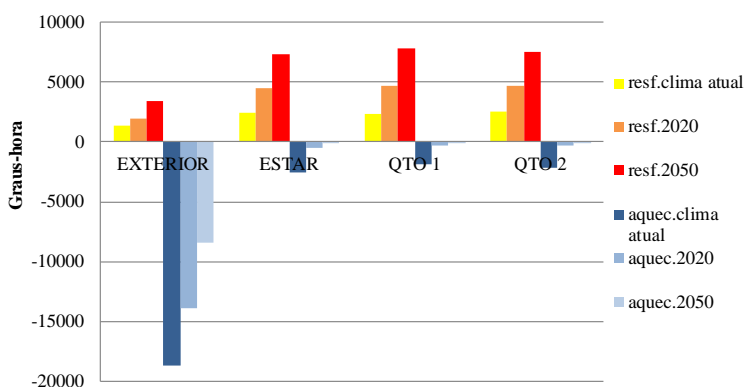
6.2.3 Resultados para a cidade de São Paulo

Os resultados das simulações para a cidade de São Paulo são aqui apresentados.

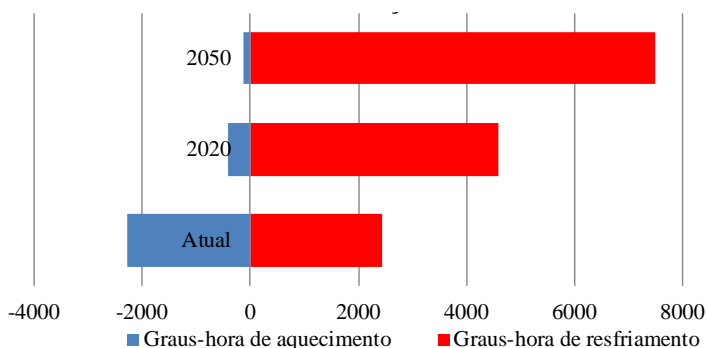
6.2.3.1 Caso base

Para o caso base de São Paulo²¹, da Figura 55 a Figura 58 mostram os resultados para a operação da edificação com ventilação natural. A Figura 55 apresenta os graus-hora anuais para resfriamento e aquecimento nos três cenários climáticos avaliados, separados por ambiente de permanência prolongada (Figura 55a), bem como sua ponderação pela área dos ambientes considerando-se um valor único por indicador para toda a habitação (Figura 55b).

Figura 55 – Graus-hora de resfriamento e aquecimento anual para o caso base em São Paulo nos cenários climáticos atual, 2020 e 2050.



a) Para o exterior e os ambientes analisados.



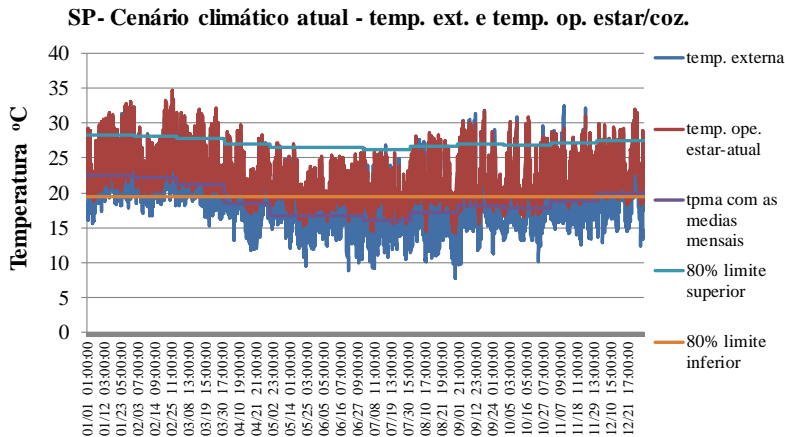
b) Média ponderada considerando os ambientes de permanência prolongada.

²¹ Considerando azimute 180°.

No caso base da cidade de São Paulo o quarto 2 apresentou mais graus-hora de resfriamento no cenário climático atual, enquanto para 2020 e 2050 essa posição foi ocupada pelo quarto 1, mas com pouca diferença entre os ambientes. Considerando-se a média ponderada dos três ambientes de maior permanência, foi observado que os graus-hora de resfriamento no cenário climático de 2050 tiveram um aumento de 206% com relação ao cenário climático atual, passando de 2.447 a 7.491 graus-hora anuais. Em contrapartida os graus-hora de aquecimento diminuíram em torno de 94% para 2050 com relação ao cenário climático atual (Figura 55b).

A Figura 56 mostra as temperaturas horárias externa e a temperatura operativa da sala de estar/cozinha para o cenário climático atual. As linhas azuis representam a temperatura externa e as linhas em vermelho a temperatura operativa da sala de estar ao longo do ano. A linha roxa representa a temperatura média externa predominante ($T_{pma_{out}}$) considerando as médias mensais. A linha azul clara indica o limite superior para horas de desconforto por calor com 80% de aceitabilidade, conforme a ASHRAE 55, enquanto a linha laranja exibe o limite inferior para horas de desconforto por aquecimento levando em conta a temperatura fixa de 19,5°C.

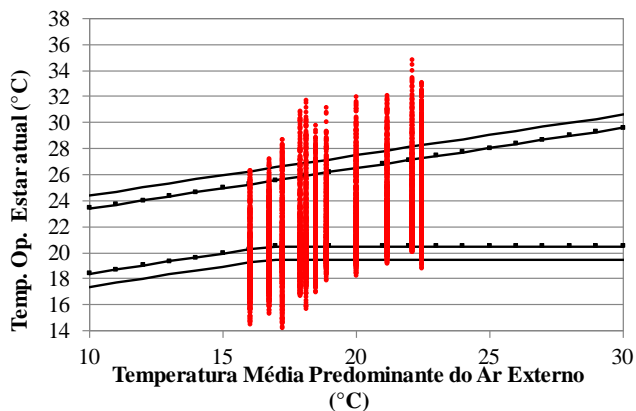
Figura 56 – Temperaturas na sala de estar do caso base em São Paulo no cenário climático atual.



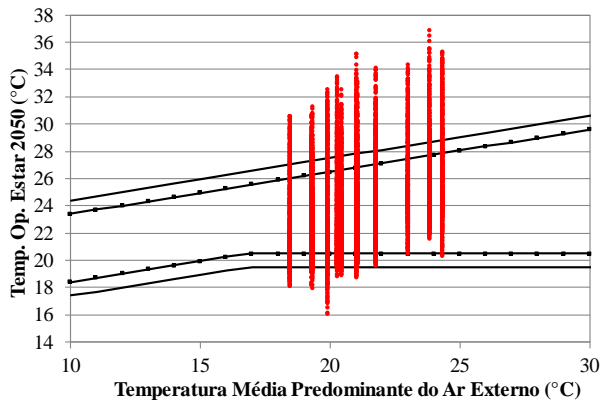
A Figura 57 mostra os resultados para todas as horas do ano considerando a representação com o método adaptativo da ASHRAE 55

para a sala de estar nos cenários atual e 2050 sendo temperatura média predominante do ar externo (T_{pma})_{out} calculada com as médias mensais.

Figura 57 – Avaliação de conforto do ambiente sala de estar no caso base em São Paulo.



a) Cenário climático atual

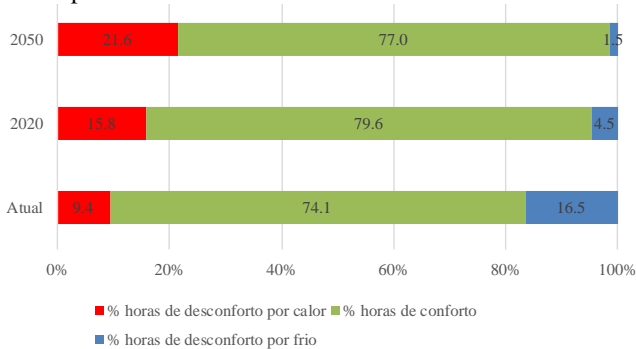


b) Cenário climático 2050

Observou-se nas figuras anteriores no ambiente de estar que embora o limite superior para horas de desconforto por calor tenha aumentado nos cenários de clima futuro, teve-se um aumento das horas de desconforto por calor. De forma contrária, a presença da temperatura operativa abaixo do limite de frio estimado em 19°C diminuiu. A Figura 58 mostra os resultados da análise das horas de desconforto por calor e frio considerando somente as horas ocupadas para o caso base em São

Paulo. Para tal, mostra-se a média ponderada de todos os ambientes de permanência prolongada para obter-se um valor único na habitação.

Figura 58 – Porcentagens de horas de desconforto por frio, calor e horas de conforto anual para os três cenários climáticos em São Paulo.



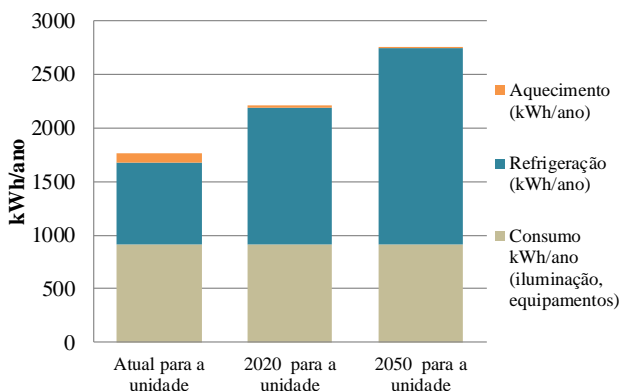
Os resultados da análise de conforto mostraram que a porcentagem de horas de desconforto por calor para a habitação passou de 9,4% no cenário climático atual para 21,6% no cenário de 2050, ou seja, teve um aumento de 129%, enquanto as horas de desconforto por frio mostraram uma redução de 16,5% no cenário atual para 1,5% em 2050, ou seja, uma redução de 90% (Figura 58).

Contudo, as horas de conforto apresentaram aumento para os climas futuros com relação à situação atual, passando de 74% no cenário atual para 77% das horas em conforto em 2050, pois considera-se nesta avaliação o aumento gradual nos cenários futuros dos limites da temperatura para conforto por calor como adaptação às novas temperaturas mais altas. Igualmente por conta da ampla redução da necessidade de aquecimento. Dessa forma, esta avaliação mostraria, se considerado a soma das horas de desconforto por frio e calor, que as habitações em São Paulo conforme construídas hoje seriam mais confortáveis no cenário futuro. Porém, é discutível o limite dos 19,5 °C para aquecimento, em especial em residências, pois, de forma geral, observa-se uma facilidade maior de adaptação ao frio no Brasil por não se tratar de temperaturas extremas ou por tempo prolongado. Acredita-se que, para casas com ventilação natural (forma de operação predominante no Brasil) o problema no futuro será a adaptação ao aumento da temperatura. Nas etapas posteriores pretende-se considerar de forma conjunta avaliações que relacionem de forma simultânea os indicadores das necessidades de frio e calor para São Paulo. Assim não se julgou

adequado para os objetivos desta pesquisa usar o indicador de horas de desconforto para a avaliação proposta. Acredita-se que o tema de conforto no setor residencial precisa de mais pesquisa no país, porém fica fora do escopo desta tese. Para tanto, foi adotado nas posteriores análises o indicador de graus-hora (para resfriamento e aquecimento), como um indicador que pode ser relacionado ao conforto do usuário, já que este representa o comportamento da edificação com a ventilação natural, e, conseqüentemente, influencia no conforto do usuário.

Para a análise energética da edificação, foi considerado o consumo anual previsto para refrigeração e aquecimento, assim como o consumo com equipamentos e iluminação. A Figura 59 apresenta os resultados para o caso base em São Paulo nos três cenários climáticos.

Figura 59 – Consumo energético total anual por uso final para o caso base em São Paulo nos três cenários climáticos.

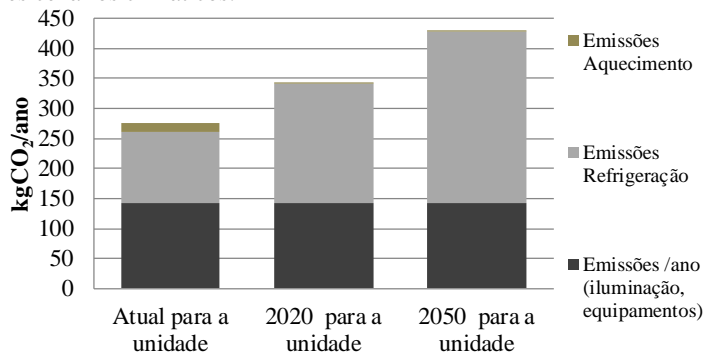


A análise energética da edificação para São Paulo mostrou consumo predominante para refrigeração em todos os cenários climáticos, com tendência de aumento, passando de 760 kWh/ano de consumo para a unidade no cenário climático atual, ou 19,12 kWh/(m²/ano) para 1.825 kWh/ano no cenário de 2050 ou 45,92 kWh/(m²/ano), ou seja teria-se um aumento de 140% considerando somente o consumo de energia de AVAC. Em contrapartida, o consumo para aquecimento foi reduzido de forma drástica, passando de 87 kWh/ano (ou 2,18 kWh/(m²/ano)) para 4 kWh/ano (ou 0,10 kWh/(m²/ano)) (Figura 59). É importante lembrar que o uso do condicionamento artificial está vinculado à ocupação dos ambientes, portanto quando se apresentaram as horas com temperatura mais baixa na sala de estar, o que acontecia à noite, o ambiente não

encontrava-se ocupado. O consumo total da habitação, teve um aumento nos cenários futuros, reflexo do aumento no consumo para refrigeração, uma vez que os usos finais de iluminação e equipamentos foram considerados fixos ao longo do tempo, e o consumo com aquecimento foi reduzido. Desta forma, o consumo total da habitação passaria de 1.763 kWh/ano no cenário do clima atual (ou 44,36 kWh/(m²/ano) para 2.205 kWh/ano (ou 55,48 kWh/(m²/ano) no cenário de 2020 e 2.746 kWh/ano (ou 69,09 kWh/(m²/ano)) no cenário de 2050. Ou seja, isso significa passar de uma média mensal estimada de 145 kWh/mês a 184 kWh/mês e 229 kWh/mês, respectivamente nos três cenários climáticos, desconsiderando-se o uso de aquecimento de água. O PNE 2030 estimou a variação do consumo de energia elétrica em 2030 entre 245 kWh/mês no cenário mais otimista a 308 kWh/mês no cenário mais pessimista. Os pressupostos dos cenários do PNE são outros e não foram consideradas as mudanças climáticas. Dessa forma, se não fosse considerado o consumo das cargas internas fixo e levando em conta ainda o consumo com aquecimento de água, o aumento no consumo de energia poderia ser ainda maior no futuro.

De outro lado, a Figura 60 mostra as emissões totais anuais de CO₂ para os três cenários climáticos como resultado do consumo de energia elétrica com condicionamento ambiental, equipamentos e iluminação para o caso base em São Paulo.

Figura 60 – Emissões totais anuais por uso final para o caso base de São Paulo nos três cenários climáticos.



Como esperado, as emissões de CO₂ na operação acompanham a tendência do aumento no consumo para condicionamento ambiental, sendo maiores por conta da refrigeração, com alto aumento no cenário climático futuro, enquanto praticamente desapareceram por causa do

aquecimento para o cenário de 2050. No cenário atual as emissões para refrigeração passariam de 118,6 kgCO₂/ano (ou 2,98 kgCO₂/(m²/ano)) para 284,8 kgCO₂/ano (ou 7,16 kgCO₂/(m²/ano)) no cenário de 2050 (Figura 60). As emissões totais de operação para o caso base incluindo emissões com iluminação e equipamentos, além das emissões com o condicionamento ambiental previsto, variariam de 275 kgCO₂/ano no cenário atual para 344 kgCO₂/ano no cenário de 2020 até 428 kgCO₂/ano no cenário de 2050. Ou seja, passaram de 6,91 kgCO₂/(m²/ano) no cenário atual para 10,77 kgCO₂/(m²/ano) no cenário de 2050. As emissões para iluminação e equipamentos foram de 142,91 kgCO₂/ano ou 3,17 kgCO₂/(m²/ano).

Para a comparação dos resultados obtidos, o estudo de Caldas et al. (2015) para habitação de interesse social em Brasília mostrou valores de emissão para equipamentos e eletricidade incluindo chuveiro elétrico de 148kgCO₂/m² para 50 anos ou 2,97kgCO₂/m² na média anual levando em conta só equipamentos e iluminação. Entretanto, o fator de emissão adotado pelos autores foi menor por considerarem o fator de emissão com base no Balanço Energético Nacional de 2014. Se nesta pesquisa fosse considerado o fator de emissão de 2014, o valor para os mesmos usos finais de equipamentos e iluminação seria de 2,75 kgCO₂/m²/ano, ficando, assim, um valor próximo do estimado pelo estudo citado.

6.2.3.2 Casos com medidas de eficiência energética para adaptação às mudanças climáticas – Cidade de São Paulo

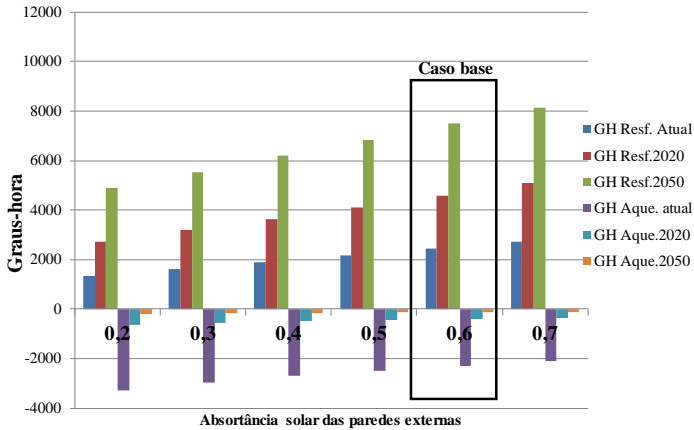
Os resultados na operação da casa térrea unifamiliar na cidade de São Paulo, com a incorporação das medidas de adaptação são mostrados a seguir. Os itens “a” até “f” correspondem aos resultados das medidas de adaptação analisados de forma isolada, ou seja, considerando a incorporação de uma única medida no caso base para cada análise realizada. O item “g” mostra os resultados das análises das medidas de adaptação de forma combinada.

a) Redução da absorvância solar das paredes externas

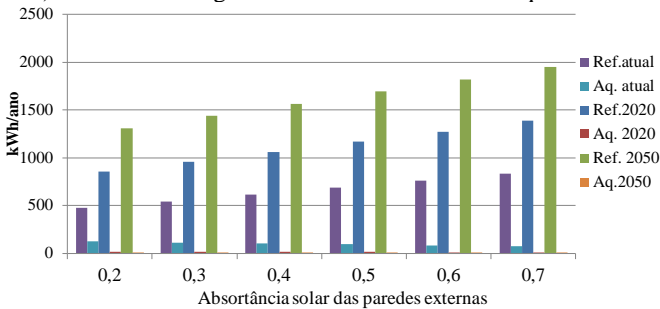
A Figura 61 mostra os resultados para os indicadores de graus-hora, consumo energético previsto e emissões de CO₂ com relação à diferentes absorvâncias solares das paredes externas nos três cenários climáticos. A Figura 61a exibe os resultados com o indicador de graus-hora para resfriamento e aquecimento. No quadro em destaque observa-

se o caso base que possui paredes externas com absorvância solar de 0,6. A Figura 61b apresenta os resultados com relação ao consumo previsto para condicionamento ambiental, enquanto a Figura 61c expõe os resultados do indicador de emissões de CO₂. Todas as figuras apresentam um valor único para a habitação obtido, conforme mencionado anteriormente, pela ponderação dos resultados dos ambientes pelas suas respectivas áreas.

Figura 61 – Resultados para diferentes absorvâncias solares na parede externa do caso em São Paulo no cenário climático atual, 2020 e 2050.

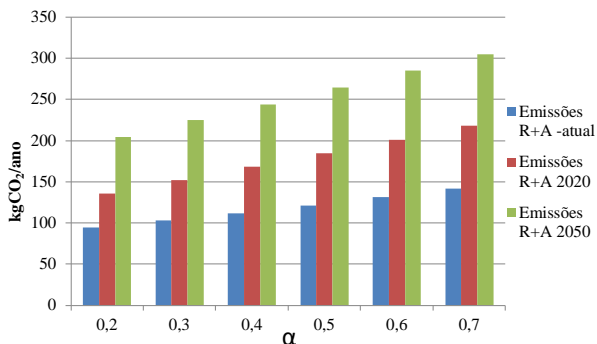


a) Indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento



b) Consumo energético previsto refrigeração e aquecimento

Figura 61 (continuação)



c) Emissões de CO₂ previstas por conta do consumo para refrigeração (R) e aquecimento (A)

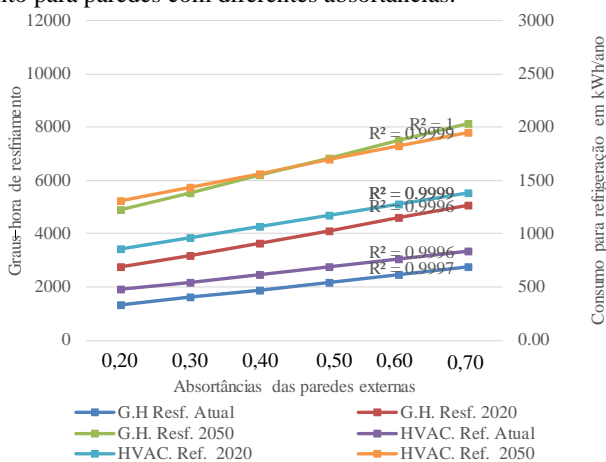
Os resultados da Figura 61a mostraram um incremento gradativo nos graus-hora de resfriamento para absorvâncias maiores. E, conforme o esperado, absorvâncias maiores reduziram os graus-hora de aquecimento. Igualmente, observou-se que, no cenário climático atual, somente a partir da absorvância solar 0,6 das paredes externas, os graus-hora de aquecimento representaram menor porcentagem com relação aos graus-hora de resfriamento. Para os cenários climáticos futuros, foi notada a predominância total dos graus-hora de resfriamento para qualquer absorvância solar analisada. Também pode ser apontado que o aumento de graus-hora de resfriamento entre as diferentes absorvâncias foi maior para os cenários climáticos futuros. No cenário atual, o caso com paredes externas de absorvância solar 0,7 mostrou uma diferença com relação à parede de absorvância solar 0,2 de 1.400 graus-hora de resfriamento, enquanto em 2050 essa diferença chegou a ser em torno de 3.200 graus-hora.

Para o consumo previsto com condicionamento ambiental mostrado na Figura 61b observou-se uma predominância total no consumo por refrigeração em todos os cenários climáticos e absorvâncias de paredes. Igualmente as emissões de CO₂ por conta do condicionamento ambiental aumentaram com o incremento da absorvância solar das paredes externas (Figura 61c).

Outras análises foram realizadas para relacionar a absorvância solar das paredes com os resultados dos indicadores de graus-hora para resfriamento e consumo previsto para refrigeração. A Figura 62 mostra esses resultados. Os resultados para os dois indicadores estão

identificados por cor conforme o cenário climático. O eixo y da esquerda exibe os resultados para graus-hora de resfriamento. O eixo y da direita apresenta o consumo previsto para refrigeração. O eixo x expõe a absorvância das paredes externas. As duas linhas superiores representam o cenário de 2050 para os indicadores de graus-hora de resfriamento e consumo previsto com refrigeração. As duas linhas intermédias representam o cenário de 2020 e as duas linhas inferiores o cenário climático atual, para os mesmos indicadores.

Figura 62 – Relação entre consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento para paredes com diferentes absorvâncias.



Nota: Casa unifamiliar térrea em São Paulo nos três cenários climáticos.

Foi observada alta correlação linear entre a absorvância solar externa das paredes e os indicadores de graus-hora de resfriamento e consumo previsto para refrigeração, a qual foi incrementada para os cenários climáticos futuros. Além disso, verificou-se para o cenário de 2050 uma influência da absorvância ainda maior da observada no cenário atual, em especial para o indicador de graus-hora de resfriamento. Dessa forma, quanto maior a absorvância solar, maiores são os valores observados nos dois indicadores.

b) Mudança na transmitância térmica e capacidade térmica das paredes externas

A Figura 63 apresenta os resultados com relação à média ponderada de graus-hora de resfriamento e aquecimento para diferentes

tipos de paredes externas nos três cenários climáticos. A Figura 64a mostra a relação entre a transmitância térmica das paredes analisadas e os graus-hora de resfriamento considerando o cenário climático de 2050. Por outro lado, a Figura 64b exibe a relação entre a capacidade térmica das paredes e os graus-hora de resfriamento para a habitação em análise, também para o cenário de 2050, com a identificação por tipo de parede e o coeficiente de correlação.

Figura 63 – Resultados para o indicador de graus-hora com diferentes tipos de paredes externas na casa térrea unifamiliar em São Paulo considerando mudanças climáticas.

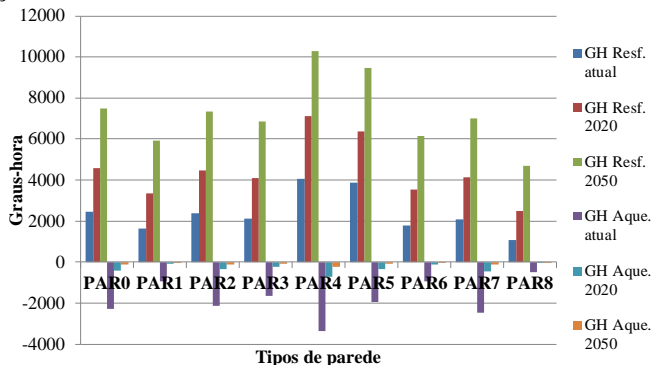
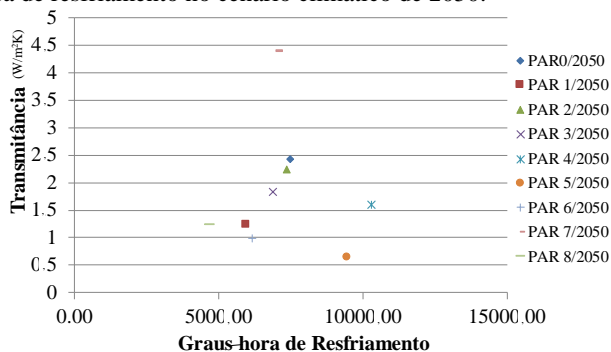
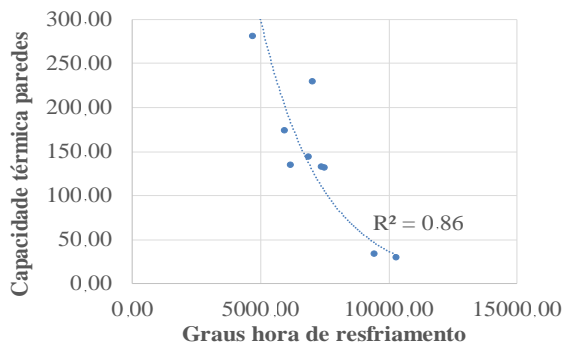


Figura 64 – Relação das propriedades térmicas das paredes externas com os graus-hora de resfriamento no cenário climático de 2050.



a) Transmitância térmica das paredes

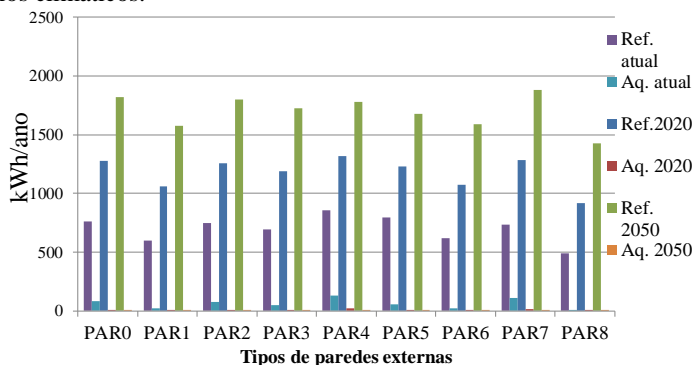
Figura 64 (continuação)



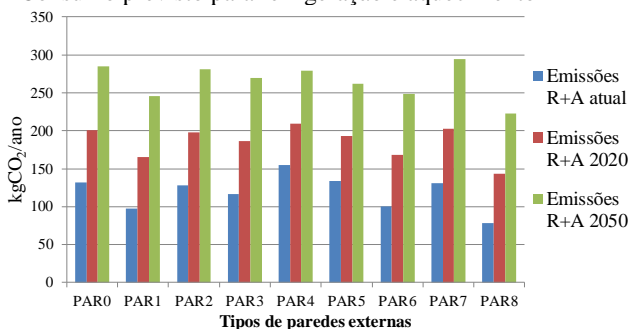
b) Capacidade térmica das paredes em kJ/(m².K)

Foi notado um melhor desempenho nos três cenários, tanto para graus-hora de resfriamento quanto para aquecimento, das paredes que apresentam baixa transmitância e média/alta capacidade térmica, como é o caso das paredes 1, 6 e 8. A parede 1 é dupla de tijolo com câmara de ar, enquanto as paredes 6 e 8 apresentam o uso de isolante de 2,5 cm na sua face externa anterior ao reboco externo. Por outro lado, observou-se baixo desempenho para os graus-hora de resfriamento e aquecimento com aumento considerável em especial nos graus-hora de resfriamento, nas paredes que apresentam a combinação de baixa capacidade térmica, tanto com média ou baixa transmitância como é o caso das paredes 4 e 5 em madeira. Esse comportamento se incrementou no cenário de 2050. Dessa forma, não se observou uma tendência no comportamento dos resultados de graus-hora de resfriamento junto à variável de transmitância térmica das paredes (Figura 64a). Contudo, a capacidade térmica das paredes mostrou uma linha de tendência exponencial, com $R^2 = 0,86$ (Figura 64b) em que paredes com maior capacidade térmica obtiveram menos graus-hora de resfriamento na habitação no clima de São Paulo. O desempenho observado no indicador de graus-hora manteve-se constante ao longo dos três cenários climáticos. Os resultados para os indicadores de consumo energético e emissões de CO₂ previstas para todos os cenários climáticos são observados na Figura 65.

Figura 65 – Resultados para consumo energético e emissões de CO₂ previstas anuais para a habitação em São Paulo com diferentes tipos de paredes e três cenários climáticos.



a) Consumo previsto para refrigeração e aquecimento



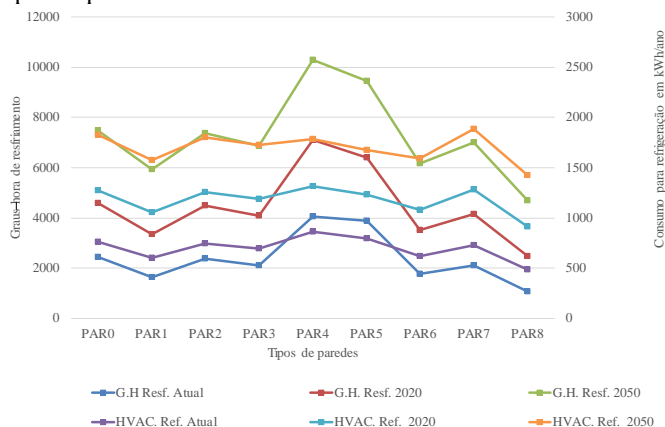
(b) Emissões de CO₂ previstas pela refrigeração (R) e aquecimento (A)

Os resultados nos indicadores de consumo e emissões previstas mostraram a parede em concreto (PAR 7) com o mais baixo desempenho com relação a esses indicadores. Igualmente para esses indicadores foi observado um comportamento diferente nos três cenários climáticos avaliados. As paredes que resultaram com melhor desempenho em relação ao indicador de graus-hora também o alcançaram com relação aos outros dois indicadores. Entretanto, encontrou-se uma mudança com relação ao comportamento das paredes em madeira e concreto dependendo do cenário climático avaliado. A parede 4 (dupla de madeira com câmara de ar) com transmitância média e baixa capacidade térmica apresentou o pior desempenho no cenário climático atual e de 2020 para os indicadores de consumo para refrigeração e emissões de CO₂; entretanto, para 2050 o pior desempenho com relação a esses indicadores

foi observado para a parede de concreto (que apresenta alta transmitância e maior capacidade térmica), seguido do caso base. Todavia, a parede 5, de madeira com isolante e, portanto, baixa transmitância, mostrou melhor desempenho com relação ao caso base em todos os cenários climáticos nesses dois indicadores. A parede 2 que, de forma similar ao caso base possui transmitância e capacidade térmica média, acabou tendo desempenho melhor, porém muito similar ao caso base com relação aos três cenários climáticos. Com relação ao consumo para aquecimento, as paredes de concreto sem isolamento e de madeira com câmara de ar, assim como o caso base, foram as que apresentaram maior consumo, embora o mesmo foi considerado baixo e somente relevante no cenário climático atual. De forma geral, as paredes 1 (dupla de tijolo com câmara de ar) e 8 (concreto com isolante) foram as que exibiram melhor desempenho nos três indicadores avaliados.

A Figura 66 mostra a relação entre o consumo previsto para refrigeração e os graus-hora de resfriamento para todos os tipos de paredes avaliados em todos os cenários climáticos. Os resultados para os indicadores são identificados por cor conforme cenário climático. O eixo y da esquerda exibe os resultados para graus-hora de resfriamento. O eixo y da direita mostra o consumo previsto para refrigeração. No eixo x observa-se o tipo de paredes avaliadas. As duas linhas superiores representam os resultados para o cenário de 2050 nos dois indicadores avaliados. As duas linhas intermédias mostram os resultados no cenário de 2020 e as duas linhas inferiores no cenário climático atual.

Figura 66 – Consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento para os tipos de paredes analisados em São Paulo nos três cenários climáticos.

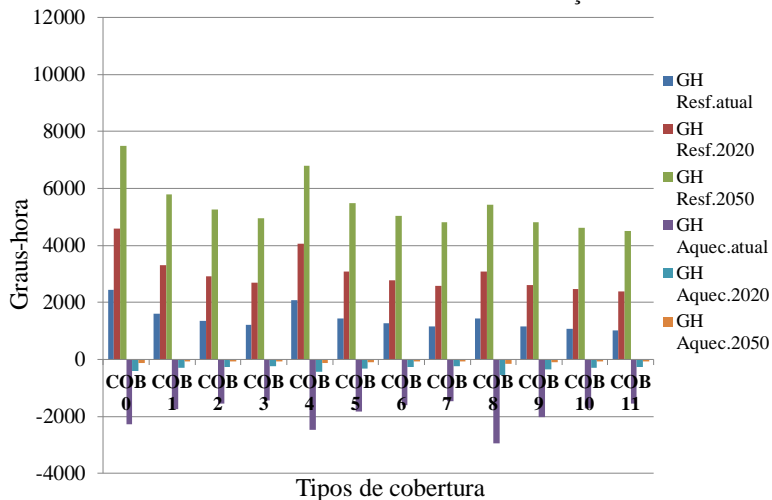


Ficou evidente a diferença do comportamento descrito anteriormente, em especial para as paredes de madeira e concreto. Igualmente, mostra-se um aumento na amplitude nos graus-hora de resfriamento estimados entre os diferentes tipos de parede para o cenário de 2050 com relação ao cenário climático atual em especial para as paredes em madeira (Figura 66).

c) Coberturas com maior resistência térmica

Os resultados das análises para as medidas com relação à coberturas são apresentados a partir da Figura 67 até a Figura 70. A Figura 67 mostra os resultados para o indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento para todos os cenários climáticos analisados levando em conta o caso base (COB0) e a mudança com dez tipos de cobertura.

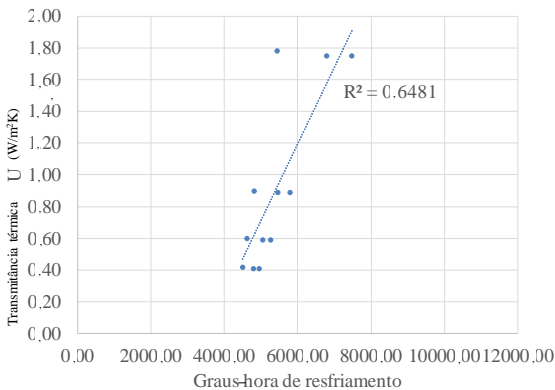
Figura 67 – Graus-hora de resfriamento e aquecimento para os tipos de cobertura analisados nos três cenários climáticos na habitação em São Paulo.



Para o indicador de graus-hora para resfriamento, todas as coberturas analisadas apresentaram melhoria com relação ao caso base, contudo o mesmo não aconteceu para o indicador de graus-hora de aquecimento (Figura 67). Por outro lado, entre as opções analisadas, as coberturas sem isolante (COB0, COB4 e COB8) exibiram maiores graus-hora tanto para resfriamento quanto para aquecimento, portanto, pior desempenho. E, entre elas o melhor desempenho para resfriamento foi

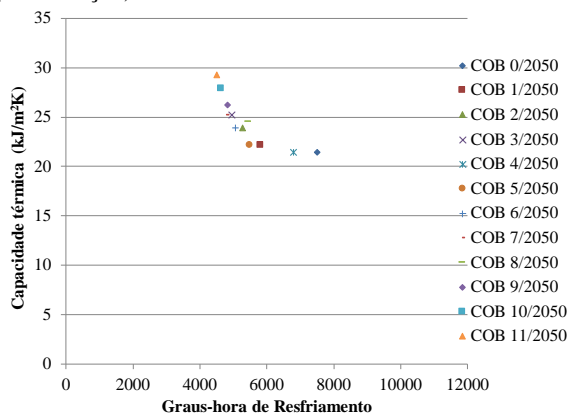
observado na cobertura com menor absorvância solar (COB8). Entretanto, essa também mostrou a maior quantidade de graus-hora para aquecimento nos três cenários climáticos. De forma geral, a cobertura 11 (metálica com $\alpha:0,3$ e 7 cm de isolamento) teve o melhor desempenho com relação aos graus-hora de resfriamento nos três cenários, principalmente por causa da baixa absorvância e da camada de isolante, que proporciona menor transmitância térmica. Contudo, não ocupou a mesma posição para aquecimento, embora não seja das que indicaram maiores graus-hora de aquecimento. Outros tipos de cobertura como a telha de barro, em especial clara, também conseguiram desempenhos similares aos da cobertura metálica; no entanto, com o uso de isolantes com maior espessura. Dessa forma, foi comparável o desempenho para os graus-hora de resfriamento da cobertura 6 com a cobertura 9, tendo a cobertura 6 obtido menos graus-hora no aquecimento. As coberturas 1 e 5 com telha de barro e isolante 2,5 cm apresentaram graus-hora para resfriamento similares aos da cobertura 8 metálica sem isolamento. A baixa absorvância da telha metálica compensou a falta de isolamento. Dessa forma, notou-se o isolamento sendo mais eficaz a partir de 5 cm em telhas com absorvâncias médias. A Figura 68a mostra a relação entre a transmitância térmica das coberturas analisadas e os graus-hora de resfriamento para o cenário climático de 2050. E a Figura 68b exibe a relação entre a capacidade térmica das coberturas e os graus-hora de resfriamento para o mesmo cenário de 2050.

Figura 68 – Coberturas na casa térrea unifamiliar em São Paulo no cenário 2050.



a) Relação entre transmitância térmica e graus-hora de resfriamento

Figura 68 (continuação)



b) Relação entre capacidade térmica e graus-hora de resfriamento

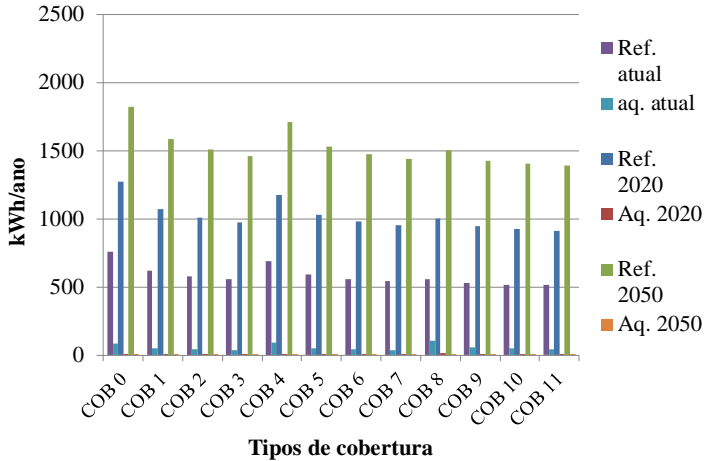
A transmitância térmica não mostrou alta correlação com os graus-hora para resfriamento (Figura 68a). No entanto, transmitâncias mais altas foram as que apresentaram maiores graus-hora nos casos analisados, com exceção da COB8, que exibiu menos graus-hora por causa da baixa absorvância, conforme já foi colocado anteriormente. Com relação à capacidade térmica (Figura 68b), observou-se que na amostra todas as coberturas avaliadas possuíam valores muito semelhantes de capacidade térmica e sua relação com graus-hora de resfriamento mostrou uma linha de tendência de queda entre as coberturas onde influenciou o isolamento e a absorvância solar. Coberturas mais isoladas e com menor absorvância tiveram melhor desempenho neste quesito. A tendência de queda se estabilizou para coberturas que apresentavam absorvância solar meia ou alta e não usavam isolante.

Os resultados para consumo previsto com condicionamento ambiental e suas emissões de CO₂ associadas, para os três cenários climáticos podem ser vistos na Figura 69.

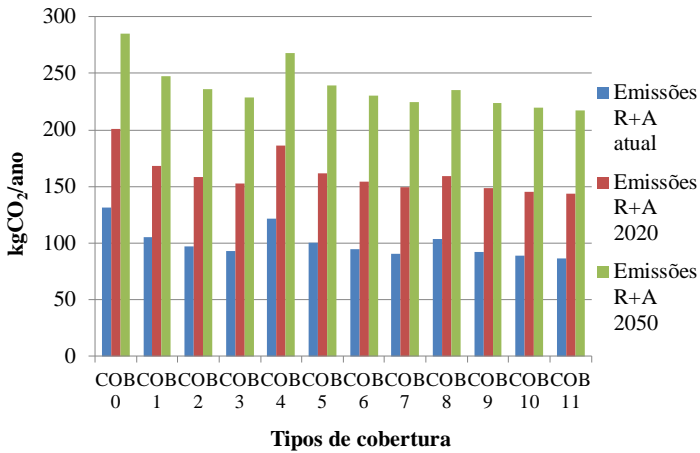
Para os indicadores de consumo energético com AVAC e emissões de CO₂ previstas, o comportamento das coberturas foi similar à situação com ventilação natural. As coberturas com isolamento apresentaram melhor desempenho quando comparadas com as que não possuíam isolamento, conservando-se esse comportamento nos três cenários climáticos. O caso base (COB0) mostrou novamente o pior desempenho e a cobertura 11 o melhor. Coberturas com maior espessura de isolamento (7 cm) exibiram melhor desempenho, porém a diferença no

desempenho para as outras espessuras de isolamento (2,5 cm e 5 cm) foi menor nesses indicadores do que o observado no indicador de graus-hora.

Figura 69 – Resultados para as coberturas analisadas na habitação em São Paulo para todos os cenários climáticos.



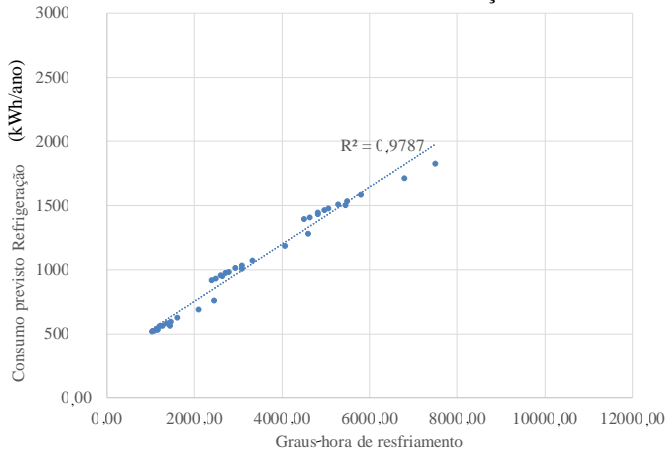
a) Consumo previsto com refrigeração e aquecimento



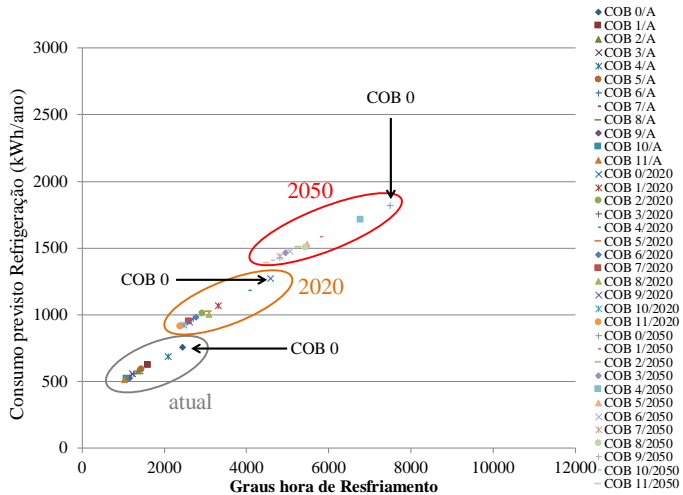
b) Emissões de CO₂ por conta do consumo previsto para refrigeração (R) e aquecimento (A)

Assim, observou-se que o consumo previsto para refrigeração mostrou uma relação linear com os graus-hora de resfriamento para todos os cenários climáticos com um alto coeficiente de determinação (Figura 70a). Contudo, a amplitude entre os diferentes tipos de coberturas estendeu-se para o cenário de 2050 quando comparado com o cenário do clima atual (Figura 70b).

Figura 70 – Consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento para as coberturas nos três cenários climáticos na habitação em São Paulo.



a) Linha de tendência e coeficiente de determinação



b) Identificação por tipo de cobertura e cenário climático, sendo A= atual

De forma geral e com relação aos três indicadores que avaliam a melhoria de desempenho no calor, todas as medidas de adaptação avaliadas para a cobertura apresentaram melhorias em relação ao caso base para todos os cenários climáticos. O mesmo não ocorreu para os indicadores que avaliaram melhorias com relação ao desempenho no frio, tendo várias medidas aumentado os indicadores com relação ao caso base, em especial nos graus-hora de aquecimento. Contudo, o aquecimento novamente só foi colocado em evidência para a avaliação com o cenário climático atual.

d) Tipos de forro

Os resultados com relação aos forros, analisados para os três indicadores são mostrados nas Figuras 71 e 72.

Figura 71 – Resultados para o indicador de graus-hora nos forros analisados na habitação em São Paulo considerando os três cenários climáticos.

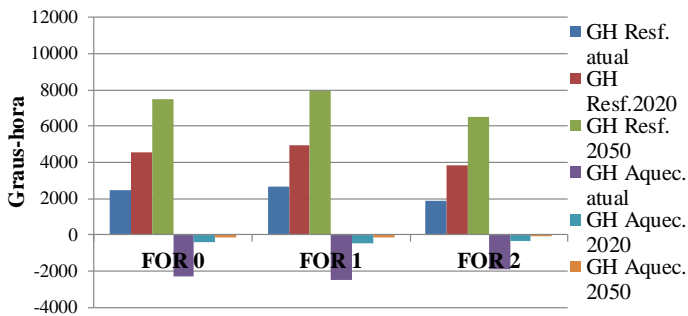
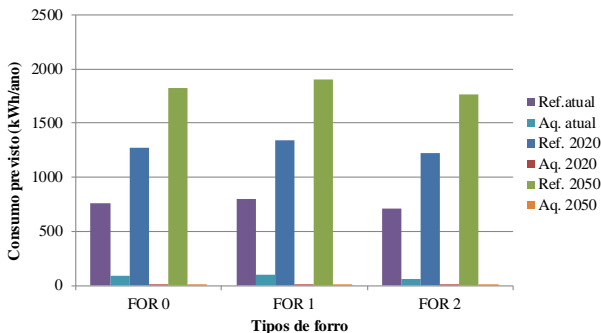
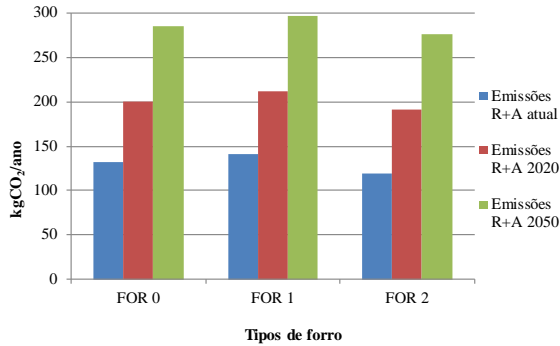


Figura 72 - Resultados para forros analisados com relação ao consumo com AVAC e emissões de CO₂ na habitação em SP nos três cenários climáticos.



a) Consumo previsto de refrigeração e aquecimento

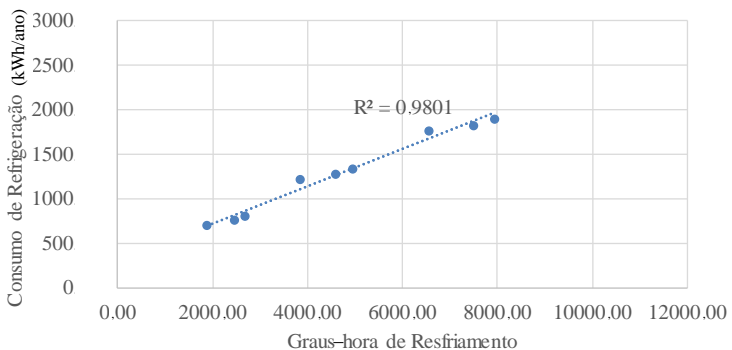
Figura 72 (continuação)



b) Emissões previstas com uso da refrigeração (R) e aquecimento (A)

Os três forros avaliados mostraram comportamento muito semelhante, em especial no cenário climático atual. Para todos os indicadores, o forro 2 (FOR2 – laje com EPS) exibiu desempenho superior em comparação aos outros tipos de forro, evidenciando-se mais esse desempenho para 2050. Por outro lado, o forro de madeira teve o desempenho mais baixo em todos os indicadores e o forro do caso base (PVC), desempenho intermediário entre os três tipos de forro analisados. Contudo, a diferença no desempenho entre eles não foi significativa, em especial se comparado o forro de PVC com o de madeira. A Figura 73 mostra a alta correlação linear entre o consumo previsto para refrigeração e os graus-hora de resfriamento nos três cenários climáticos para os forros analisados.

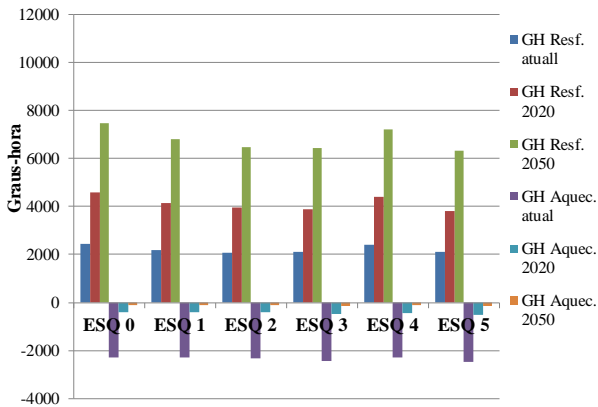
Figura 73 – Relação entre consumo previsto para refrigeração e graus-hora de resfriamento nos forros para São Paulo nos três cenários climáticos.



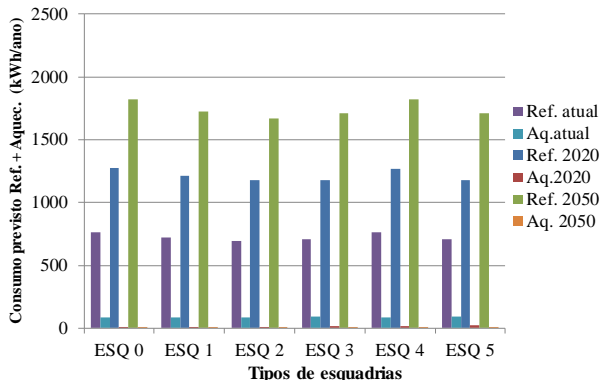
e) Incremento na ventilação e sombreamento por meio das esquadrias

Resultados das medidas de adaptação relacionadas à mudança nas esquadrias nos três cenários climáticos são mostrados a seguir. A Figura 74a exibe os graus-hora de resfriamento e aquecimento. A Figura 74b apresenta o consumo previsto para refrigeração e aquecimento. A Figura 75 mostra a relação entre os indicadores de consumo previsto com refrigeração e graus-hora de resfriamento considerando todos os casos analisados nos três cenários climáticos.

Figura 74 – Resultados das análises com diferentes esquadrias para a habitação em São Paulo nos três cenários climáticos.

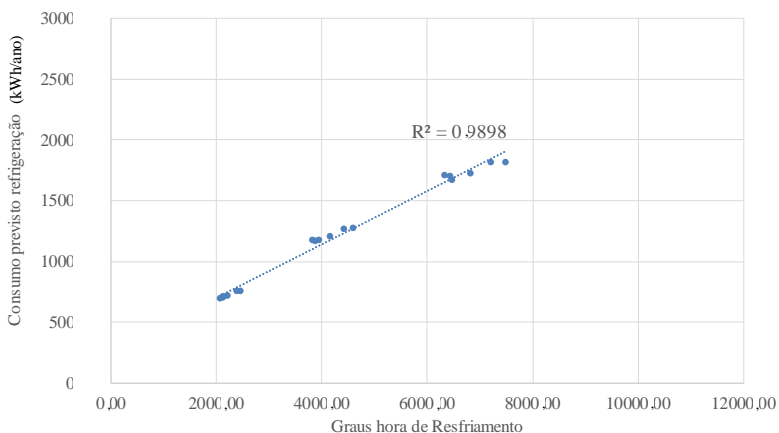


a) Resultados de graus-hora



b) Consumo previsto com refrigeração e aquecimento

Figura 75 – Relação entre consumo previsto com refrigeração e graus-hora de resfriamento para as esquadrias analisadas na habitação em São Paulo nos três cenários climáticos.



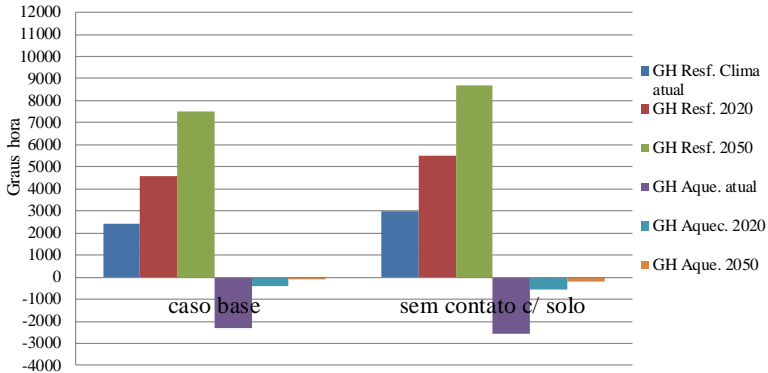
Todas as medidas propostas com relação às esquadrias apresentaram melhorias em comparação com o desempenho do caso base, para os indicadores analisados com relação à resfriamento e refrigeração. Foram observadas maiores diferenças para o uso da habitação com ventilação natural. Para os indicadores com relação ao aquecimento, todos os casos mostraram desempenho muito semelhante, tendo aumento nos graus-hora para aquecimento e consumo para aquecimento em relação ao caso base. Porém, essa diferença não foi significativa. Observou-se também um desempenho semelhante com relação ao desempenho das medidas para os dois tipos de operação da edificação. De forma geral, a esquadria 2 com sombreamento nos quartos e sala de estar foi a que demonstrou melhor desempenho nos três cenários climáticos e nos três indicadores, seguida da esquadria 3 (fator de ventilação 90%) e posteriormente da esquadria 5 (janelas maiores com fator de ventilação 90%). Contudo, o aumento no tamanho da esquadria sozinho não apareceu como sendo tão efetivo quanto o sombreamento ou o aumento no fator de ventilação. Todavia, a relação entre graus-hora de resfriamento e consumo para refrigeração com as medidas de mudanças nas esquadrias exibiu uma relação linear para todos os casos analisados com alta correlação (Figura 75).

f) Edificação sem contato com o solo

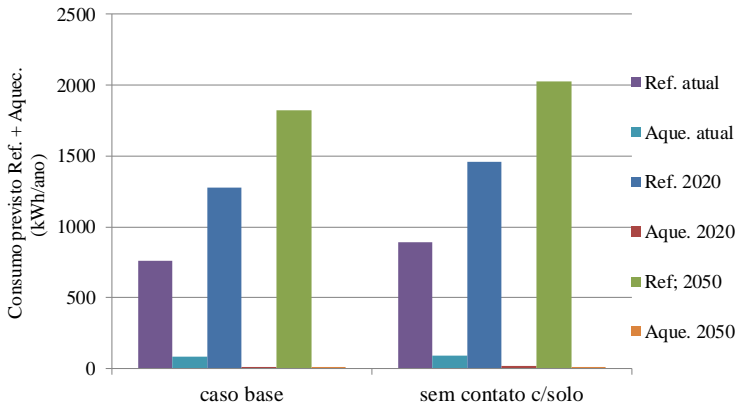
Os resultados para o caso da edificação sem contato com o solo podem ser vistos a seguir. A Figura 76a mostra os resultados com relação

aos graus-hora de resfriamento e aquecimento. A Figura 76b apresenta os resultados para condicionamento ambiental previsto, considerando refrigeração e aquecimento.

Figura 76 – Resultados com relação ao contato com o solo nos três cenários climáticos em São Paulo.



a) Graus-hora de resfriamento e aquecimento



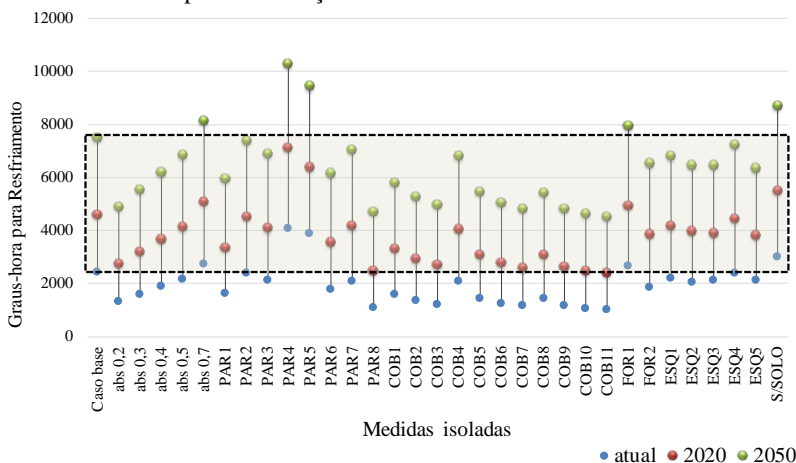
b) Consumo energético previsto com refrigeração e aquecimento

Para todos os indicadores analisados, a edificação sem contato com o solo mostrou desempenho mais baixo em relação ao caso base em todos os cenários climáticos. Para o indicador de graus-hora foi observado que no cenário climático atual os graus-hora de resfriamento tiveram aumento em torno de 22%. No cenário de 2050 esse aumento ficou em torno de 16%. Igualmente, os graus-hora de aquecimento aumentaram no

cenário climático atual em torno de 11%. Para 2050 também teve aumento neste indicador; contudo, o aquecimento, como colocado anteriormente, não se mostrou significativo para os cenários climáticos futuros. Para o indicador de consumo energético e emissões previstas por conta do uso do condicionamento ambiental, o aumento ficou em torno de 7% no cenário atual e de 11% no cenário de 2050. Os resultados mostraram o comportamento esperado, em que o contato com o solo é importante para esse tipo de edificações, considerando as duas formas de operação da edificação.

Finalmente, são mostradas em um mesmo gráfico para comparação de desempenho todas as medidas avaliadas de forma isolada. As Figuras a seguir mostram os indicadores de graus-hora e consumo energético. Os resultados de consumo energético são mostrados por m² da edificação. A base da linha (ponto azul) mostra o desempenho no cenário climático atual; o ponto vermelho, o cenário climático de 2020; e o ponto verde, o cenário de 2050. A linha pontilhada mostra o desempenho do caso base considerando os três cenários climáticos para comparação com relação ao desempenho das medidas avaliadas. A Figura 77 mostra o desempenho das medidas para o indicador de graus-hora de resfriamento.

Figura 77 – Graus-hora de resfriamento para todas as medidas isoladas nos três cenários climáticos para a habitação na cidade de São Paulo.



Para os graus-hora de resfriamento, os maiores valores foram encontrados nas paredes de madeira, enquanto os menores em casos relacionados com paredes, coberturas e absorção solar baixa. O forro em madeira também contribuiu para o aumento dos graus-hora, embora

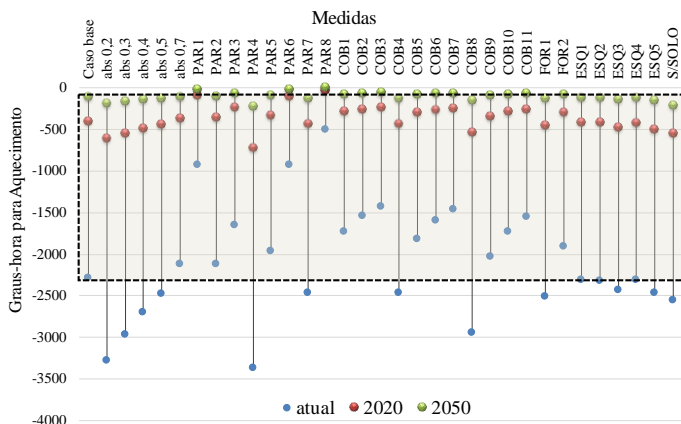
em menor proporção. As mudanças nas esquadrias, embora tenham mostrado redução nos graus-hora, não apresentaram uma diferença tão significativa em relação ao caso base quanto outras medidas. Reduções observadas em algumas das medidas de adaptação analisadas frente ao caso base, para a habitação na operação com ventilação natural, nos cenários atual e 2050 são mostradas na Tabela 32.

Tabela 32 – Reduções observadas em algumas medidas de adaptação frente ao caso base para o indicador de graus-hora de resfriamento.

Medida de adaptação	Redução de graus-hora de resfriamento em %	
	Cenário atual	Cenário 2050
ABS 0,3	34,28	25,97
PAR1	32,82	20,64
PAR6	27,59	17,79
PAR8	55,55	37,14
COB6	48,35	32,50
COB11	57,87	39,88
ESQ2	15,34	13,62
ESQ5	13,57	15,50

A Figura 78 mostra o desempenho nos graus-hora de aquecimento.

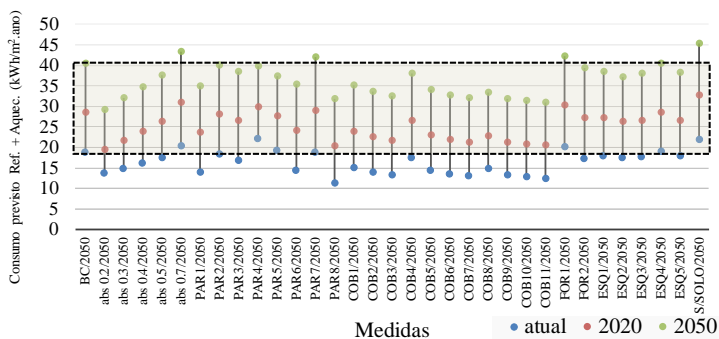
Figura 78 – Graus-hora de aquecimento para todas as medidas isoladas nos três cenários climáticos para a habitação em São Paulo.



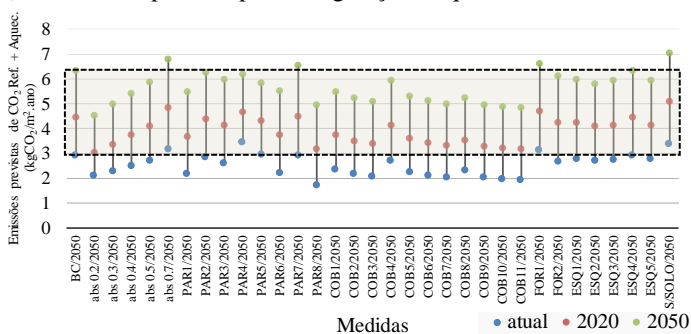
Várias medidas superaram os graus-hora de aquecimento do caso base, com destaque para a absorção solar baixa nas paredes, as paredes

em madeira, as paredes externas em concreto sem isolamento, as coberturas com menor absorvância solar e a esquadria com fator de ventilação de 0,90. Por outro lado, as medidas relacionadas com as paredes, em especial a PAR1, PAR6 e PAR8 foram as que mostraram uma redução mais expressiva para o indicador de graus-hora de aquecimento. A Figura 79 mostra os resultados por m² de área da habitação para o caso base e as medidas analisadas para os indicadores de consumo de energia previsto para resfriamento e aquecimento e as suas emissões de CO₂ associadas. Os resultados são expressos em kWh/(m²/ano) e kgCO₂/(m²/ano), respectivamente.

Figura 79 – Resultados por m² do caso base e medidas de adaptação para o uso da habitação em São Paulo com condicionamento ambiental no cenário climático atual, 2020 e 2050.



a) Consumo previsto para refrigeração e aquecimento



b) Emissões de CO₂ previstas com o uso de AVAC

Com relação ao uso previsto de AVAC para refrigeração e aquecimento, as medidas de coberturas com absorvância solar mais baixa

e isolante destacaram-se no conjunto por terem bom desempenho, assim como a medida de menor absorvância na parede. E ainda alguns casos de paredes, em especial a parede dupla de tijolo (PAR1) e as paredes com isolante (PAR6 e PAR8), apresentaram bom desempenho (Figura 79). Reduções observadas para o consumo de AVAC frente ao caso base em algumas das medidas analisadas considerando o cenário climático atual e 2050 são mostradas na Tabela 33.

Tabela 33 – Reduções observadas no consumo previsto de AVAC para refrigeração e aquecimento em algumas medidas de adaptação frente ao caso base.

Medida de adaptação	Redução no consumo de AVAC em %	
	Cenário atual	Cenário 2050
ABS 0,3	21,86	20,98
PAR1	26,18	13,61
PAR6	23,94	12,87
PAR8	40,82	21,74
COB6	28,18	19,13
COB11	34,07	23,64
ESQ2	7,41	8,22
ESQ5	4,67	5,82

g) Combinação de medidas

Após análise das medidas isoladas, foram escolhidas algumas medidas para avaliação em conjunto, com base naquelas que apresentaram melhor desempenho ou desempenho representativo de um conjunto (Tabela 34).

Tabela 34 – Variáveis analisadas nas simulações em conjunto para os três cenários climáticos na cidade de São Paulo.

Orientação	Azimute 0°
Absortância	ABS0,3 ABS0,6
Parede	PAR1 __ Parede dupla tijolo furado
	PAR3 _Alvenaria 18cm com tijolo 9 furos reboco interno e externo
	PAR5 _Parede madeira dupla com isolante
	PAR8 _Concreto com isolante e considera PAR7 interna de concreto sem isolante
Cobertura	COB6 _Telha barro clara com isolante 5cm
	COB10 _Telha metálica com isolante 5cm

Tabela 34 (Continuação)

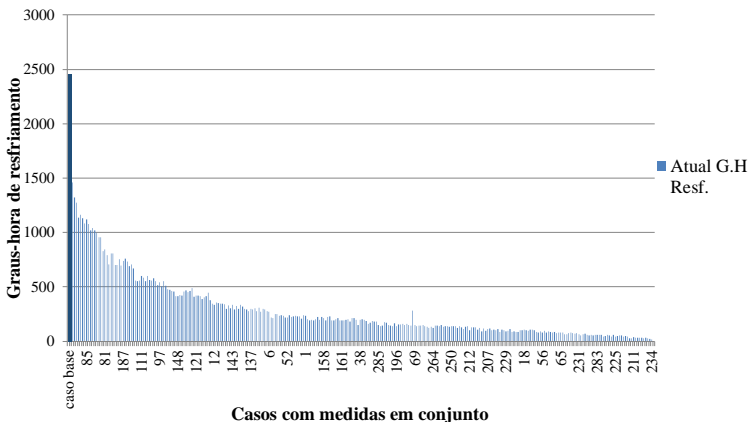
Forro	FOR0_Forro em PVC
	FOR1_Forro em madeira
	FOR2_Forro de laje com EPS
Venezianas	ESQ1_Venezianas nos quartos (assumido em todas as simulações)
	ESQ2_Veneziana nos quartos e sala de estar
Fator de ventilação para sala de estar/cozinha e quartos	ESQ0_FV 0,45 ESQ3_FV 0,90
Altura verga esquadrias (todas)	ESQ0_Altura das janelas em 2,10m ESQ4_SP_Altura das janelas em 2,30m (+ 0,20cm na altura) ESQ8_SAL_Altura das janelas em 2,30 e altura peitoril da janela da sala de estar/cozinha em 0,80 (aumento total de + 0,50cm na altura da janela)
Contato com o solo	CS_Edificação em contato com o solo (assumido em todas as simulações)

Nota: SP = casos em São Paulo; SAL = casos em Salvador

A orientação de azimute 0° foi considerada como uma estratégia por representar o melhor desempenho diante de outras orientações conforme mencionado anteriormente, e, portanto, todas as simulações com medidas de adaptação combinadas foram realizadas considerando esse azimute. Em todas as simulações a edificação foi assumida como estando em contato com o solo, por mostrar um melhor desempenho na avaliação com relação a esse quesito. Foram escolhidas como variáveis as absorvâncias de paredes 0,3 e 0,6, por exibirem desempenhos médios representativos entre absorvâncias baixas (parede com α 0,3) e absorvâncias médias a altas (parede com α 0,6). Das paredes foram escolhidas a parede dupla com tijolo (PAR1) e a parede de concreto com isolante (PAR8), que mostraram bom desempenho nos indicadores avaliados. Igualmente, foi incluída a PAR3 com alvenaria de tijolo de 18 cm, por representar um sistema construtivo similar ao caso base, contudo que apresentou um melhor desempenho. Também foi incluída na análise a parede em madeira com isolante, que, embora não tenha mostrado bom desempenho na operação com ventilação natural, foi considerada para esta análise por causa da diversidade de materiais, o que seria importante para a abordagem integrada proposta na etapa posterior. Das coberturas, escolheram-se aquelas que mostraram bom desempenho levando-se em conta os dois tipos de materiais analisados, cobertura em telha de barro e

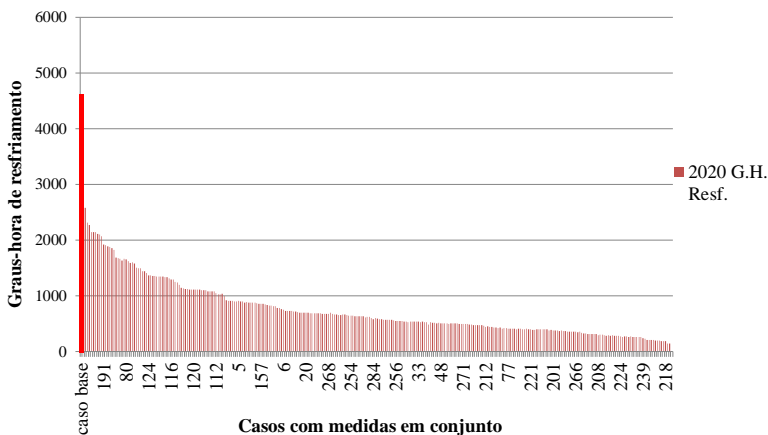
metálica. Assim, foram consideradas a COB6 em telha de barro com isolante 5 cm e a COB10 em telha metálica com isolante 5 cm. Foram escolhidos os três forros para análise. Contudo, para paredes em madeira, optou-se por levar em consideração somente o forro em madeira. Das esquadrias, considerou-se para todos os casos com medidas de adaptação, que as janelas dos quartos tinham venezianas (ESQ1), sendo a opção avaliada a colocação de venezianas também na sala de estar (ESQ2). Para o fator de ventilação das esquadrias, levou-se em conta como opção 45% (ESQ0) e 90% (ESQ3). Para a altura das esquadrias, foi avaliada a altura em 2,10 m igual ao caso base (ESQ0) e a altura em 2,30 m para São Paulo (ESQ4). Para Salvador, foi considerada em todas as simulações a ESQ8 que apresentou altura da verga em 2,30 m para todas as janelas e altura de peitoril em 0,80 m para as janelas da sala de estar/cozinha. A lista com as variáveis em cada um dos casos analisados nos três cenários climáticos para São Paulo encontra-se no **Apêndice C**. Os resultados para as medidas de adaptação analisadas em conjunto são mostrados nas figuras a seguir. A Figura 80 exibe os resultados do indicador de graus-hora de resfriamento para a habitação na cidade de São Paulo considerando os casos com medidas de adaptação aplicadas em conjunto. São mostrados os resultados dos três cenários, atual, 2020 e 2050 respectivamente. Os resultados são ordenados em ordem crescente desde o pior desempenho (caso base), até o melhor desempenho. Destaca-se com uma linha com maior espessura o caso base.

Figura 80 – Resultados para os três cenários climáticos das medidas combinadas na habitação em São Paulo para a operação com ventilação natural.

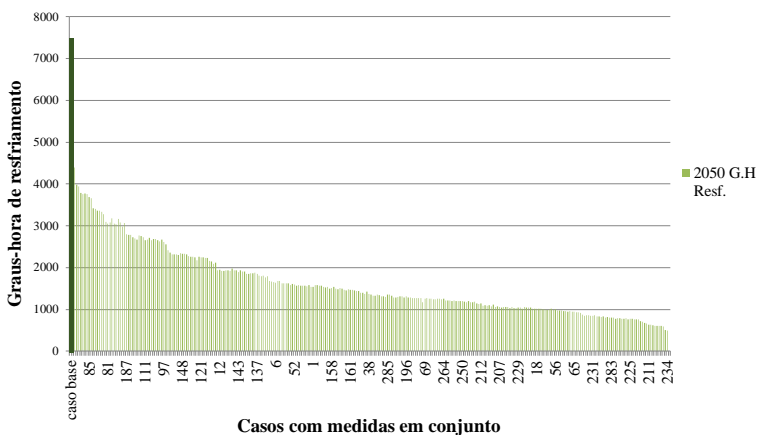


a) Cenário climático atual

Figura 80 (continuação).



b) Cenário 2020



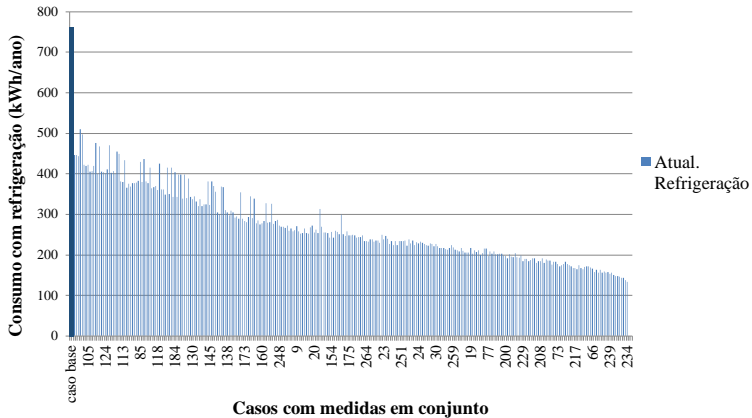
c) Cenário 2050

As reduções com relação aos graus-hora de resfriamento comparando o caso base com a incorporação de medidas de adaptação em conjunto, mostraram potencial para atingir patamares na ordem de 40% até ao redor dos 90%, com pouca variação para todos os cenários climáticos. Entretanto, ressalta-se que conforme colocado na metodologia, estes resultados estão considerando um único usuário cujas características de uso da abertura das janelas se baseiam na Etiqueta de Energia, ou seja, ventilando quando conveniente. Isto é especialmente

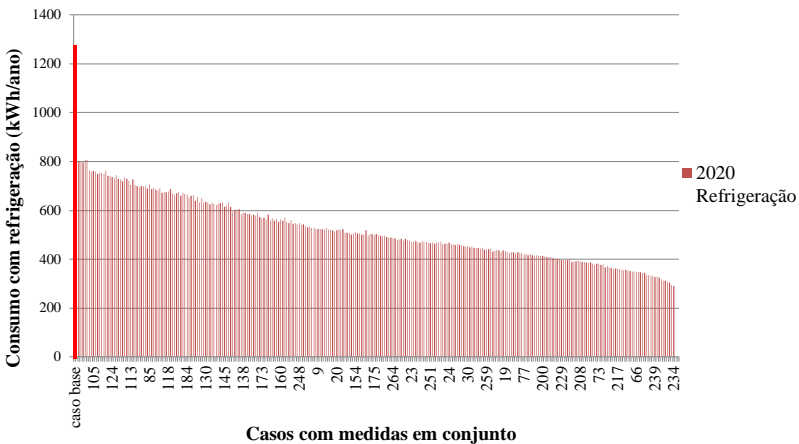
importante para os casos com maior isolamento e maior capacidade térmica, como os que têm PAR8, parede em concreto com isolamento.

A Figura 81 mostra os resultados para o caso base e medidas de adaptação aplicadas em conjunto para a habitação em São Paulo com o uso de condicionamento ambiental. Os resultados são mostrados para o consumo com refrigeração para os três cenários climáticos respectivamente.

Figura 81 – Resultados para consumo com refrigeração das medidas combinadas na habitação em São Paulo nos três cenários climáticos.

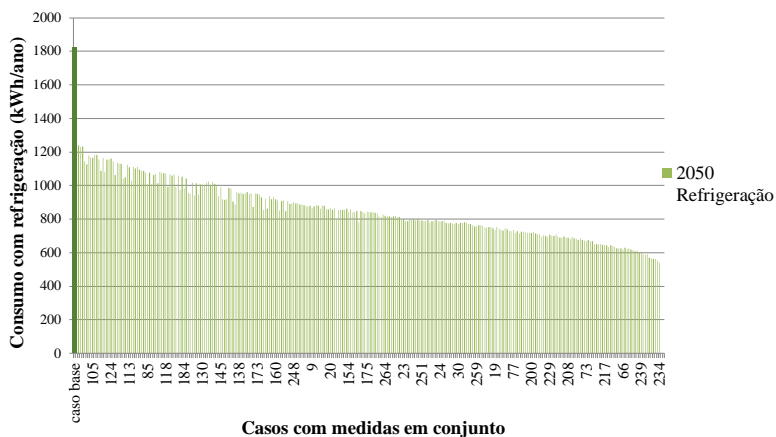


a) Cenário climático atual



b) Cenário 2020

Figura 81 (continuação).

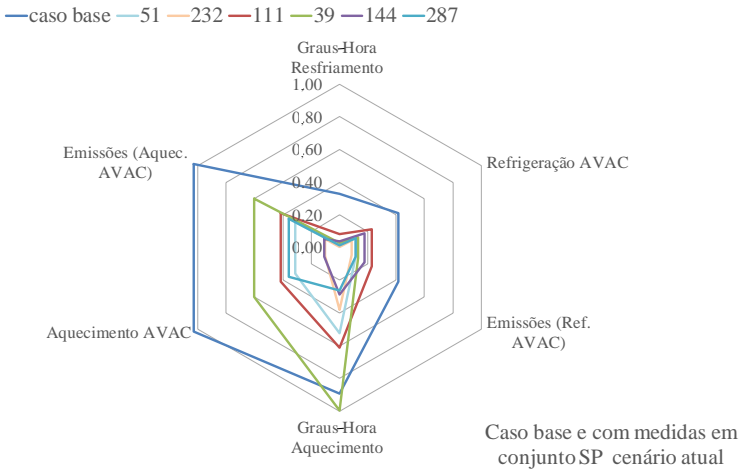


c) Cenário 2050

Para o indicador de consumo energético com refrigeração as reduções obtidas com a aplicação das medidas de adaptação analisadas mostraram tendência de reduções variável conforme o cenário climático, sendo em torno de 34% a 80% para o cenário climático atual e de 36% a 76% para o cenário de 2020. Considerando-se somente o cenário de 2050, as medidas incorporadas mostraram potencial de atingir reduções na ordem de 32% e 69% do consumo por conta da refrigeração. De forma geral teve-se maiores reduções no cenário climático atual por conta das maiores temperaturas observadas nos cenários climáticos futuros.

As reduções para o indicador de graus-hora de resfriamento foram maiores do que para o indicador de consumo energético com refrigeração. No cenário de 2050, 2/3 dos casos com medidas analisadas teriam o potencial de manter o mesmo desempenho atual do caso base para o indicador de graus-hora com resfriamento, enquanto para o uso de refrigeração seriam um pouco menos do que a metade dos casos analisados. Os resultados para a análise considerando os todos os indicadores normalizados são mostrados a seguir. Inicialmente são colocados de forma gráfica e para cada cenário climático. Para um melhor entendimento são exibidos somente o caso base e seis casos escolhidos que mostraram desempenhos representativos e com melhoria gradual. Os resultados para São Paulo no cenário climático atual podem ser vistos na Figura 82.

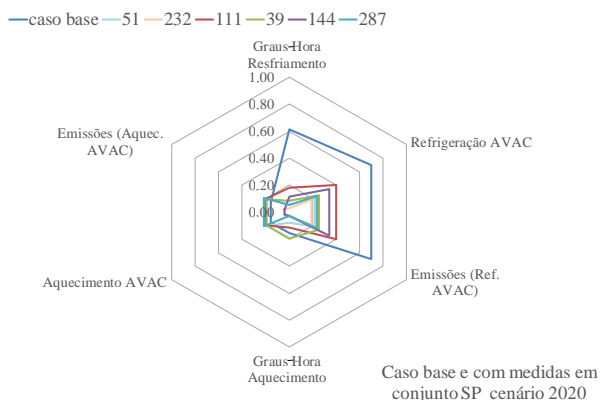
Figura 82– Resultados com indicadores normalizados para algumas medidas de adaptação analisadas em conjunto para a habitação em São Paulo no cenário climático atual.



Nota-se que quanto maior a área no gráfico, pior o desempenho do caso analisado. Dessa forma, observa-se o caso base (linha azul) com o pior desempenho no cenário climático atual na maioria dos indicadores, com exceção dos graus-hora de aquecimento, onde o caso 39 mostra um desempenho mais baixo nesse indicador. Esses resultados refletem a tendência da importância nos indicadores de aquecimento para o cenário atual, em especial com relação aos graus-hora de aquecimento. Percebe-se que em área todos os casos analisados tiveram desempenho superior ao caso base (ou seja menor área), tendo grande variabilidade entre as áreas dos casos com medidas avaliados.

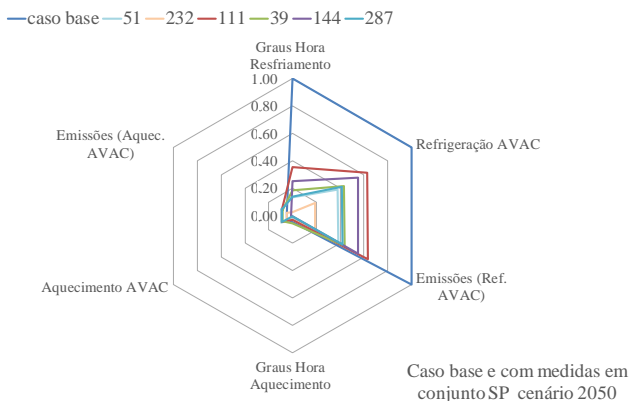
A Figura 83 mostra os resultados para casa térrea unifamiliar em São Paulo no cenário de 2020. Os resultados exibem a importância da tendência dos indicadores relacionados com resfriamento e refrigeração para esse cenário. Contudo, alguns casos analisados mantiveram valores maiores do que o caso base nos indicadores de graus-hora de aquecimento, aquecimento artificial e emissões de CO₂ para aquecimento. Por outro lado, a diferença nas áreas entre os diferentes casos analisados tornou-se menor ao observado no cenário atual, embora se manteve redução drástica da maioria dos indicadores nos casos analisados em relação ao caso base. Essa diferença se deve em parte a redução na importância dos indicadores de aquecimento.

Figura 83 – Resultados com indicadores normalizados para algumas medidas de adaptação analisadas em conjunto para a habitação em São Paulo no cenário de 2020.



A Figura 84 mostra os resultados para o cenário climático de 2050. Os resultados foram parecidos com os do cenário de 2020; contudo, a diferença com o caso base entre os casos que ainda apresentam valores maiores para os indicadores de AVAC para aquecimento e emissões de aquecimento foi muito menor do que a observada no cenário de 2020. Igualmente, o caso base mostrou os maiores valores com relação aos indicadores de resfriamento e refrigeração.

Figura 84 – Resultados com indicadores normalizados para algumas medidas de adaptação analisadas em conjunto para a habitação em São Paulo no cenário de 2050.



Observa-se nos resultados que, embora se apresentem diferentes desempenhos entre as medidas aplicadas em conjunto, todas mostraram redução significativa com relação ao desempenho na operação do caso base para todos os cenários climáticos estudados, tanto para os indicadores da habitação com uso de ventilação natural, quanto com uso de condicionamento artificial. Para um melhor entendimento da influência das diversas medidas de adaptação nos resultados obtidos, mostra-se nas próximas Figuras, a soma de todos os indicadores normalizados para cada caso por cenário climático conforme exemplo para o caso base na Tabela 35. Ressalta-se que nessa análise os valores foram normalizados considerando-se os resultados dos três cenários climáticos.

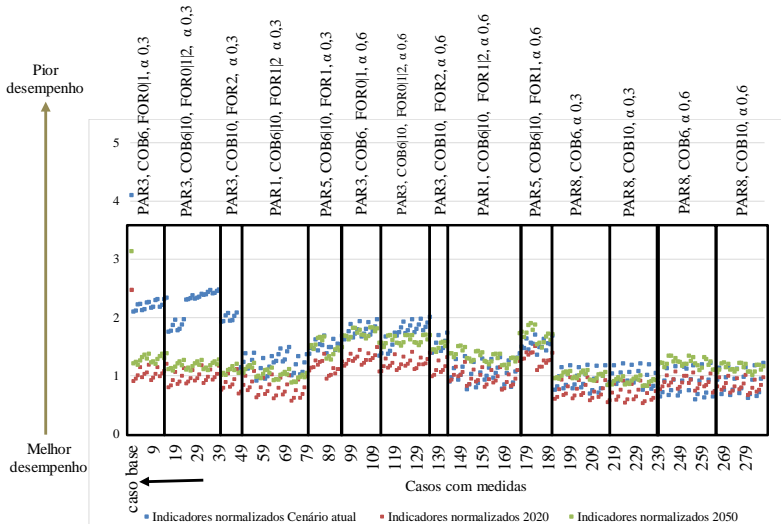
Tabela 35 – Soma dos indicadores normalizados para o caso base no cenário climático atual.

Cenário climático atual							
Caso Nº	Graus-hora resfriamento	Refrigeração AVAC	Emissões CO ₂ Refrigeração	Graus-hora Aquecimento	Aquecimento AVAC	Emissões CO ₂ Aquecimento	Soma total dos indicadores
Caso base	0,33	0,42	0,42	0,89	1,00	1,00	4,11

A Figura 85 exibe os casos por cenário climático com valores normalizados considerando a soma de todos os indicadores. Destacam-se o caso base por cenário com os valores mais altos. Os pontos em azul referem-se os casos no cenário atual; os pontos em bordô ao cenário de 2020; e os pontos em verde aos casos aos casos no cenário de 2050. No eixo x estão colocados todos os casos avaliados. Foram assinaladas com caixas de retângulos em preto as tendências de desempenho. Ainda nessa Figura, foram assinaladas e indicadas as principais medidas de adaptação contidas nas seções.

Para os cenários climáticos analisados na cidade de São Paulo, a combinação do tipo de parede usada e absorvância das paredes externas caracterizou tendência de desempenho, com variações principalmente para o tipo de cobertura. Notam-se comportamentos diferentes entre as Paredes 1, 3 e 5 (PAR1, PAR3, PAR5) (casos 0 a 191) e a Parede 8 (PAR8) (casos 192 a 287).

Figura 85 – Indicadores com valores normalizados para os três cenários climáticos na habitação em São Paulo.



Nota: A absorvância no gráfico (α) refere-se à absorvância das paredes externas.

O forro, embora em menor medida, também mostrou tendência de desempenho. Entretanto, as variáveis como o uso ou não da veneziana na sala de estar e na cozinha, o fator de ventilação e a altura da janela exibiram mudanças mais pontuais nos diversos grupos identificados. O mais baixo desempenho entre o grupo dos casos 0 a 191 foi observado para os casos de parede em alvenaria de 18 cm (PAR3), cobertura com telha de barro isolada (COB6), forro em PVC (FOR0) e/ou madeira (FOR1) e absorvância externa das paredes 0,6. Igualmente, os casos com parede em madeira (PAR5) e absorvância da parede 0,6 também apresentaram desempenho mais baixo. Por outro lado, os casos com paredes em concreto com isolante (PAR8) mostraram bom desempenho, similar aos casos da parede dupla (PAR1) com absorvância da parede 0,3. Obtiveram-se valores ainda menores para a PAR8 com absorvância da parede 0,3. Para os casos da PAR8, a tendência como grupo foi mais evidente para a absorvância da parede, mostrando alguma influência em relação à cobertura. Paredes com absorvância 0,3 mostraram valores menores do que aquelas com absorvância 0,6. Nota-se também que os melhores casos nesse grupo de parede para ambas as absorvâncias foram os que apresentaram venezianas nas janelas da sala de estar/cozinha, fator de ventilação 0,45 e, geralmente, altura da janela em 2,10 m. Tanto a

PAR1 quanto a PAR8 tiveram comportamento semelhante em todos os cenários climáticos.

Por outro lado, alguns grupos tiveram um desempenho baixo no cenário climático atual e melhor desempenho nos cenários futuros. Os grupos identificados como tendo um baixo desempenho tanto no cenário climático atual quanto futuro, tiveram em comum paredes em madeira (PAR5) nas duas absorvâncias, especialmente 0,6; e parede em alvenaria de 18 cm (PAR3) com absorvância 0,6. Para os cenários futuros, os casos com mais baixo desempenho ao longo dos diferentes grupos observados tiveram em comum casos em que não havia presença de veneziana nas janelas da sala de estar/cozinha, fator de ventilação de 0,90 e altura da janela de 2,30 m. Contrário a isso, os melhores casos nos cenários futuros para todos os grupos de tendência tiveram em comum venezianas no sala de estar/cozinha, fator de ventilação de 0,45 e altura da janelas de 2,10m. Observou-se uma tendência maior à necessidade de aquecimento para a parede em tijolo (PAR3) no cenário climático atual.

As análises realizadas evidenciaram que é possível obter bons desempenhos com diversas combinações de medidas de adaptação. Entretanto, quando considerados todos os indicadores e os três cenários climáticos a análise por tipo de parede mostrou mais casos com parede dupla de tijolo (PAR1) e parede em concreto com isolante externo (PAR8) com tendência a um melhor desempenho. Os resultados das análises realizadas com a combinação das medidas de adaptação sugeridas exibiram, de forma geral, o predomínio para os componentes da edificação como paredes e coberturas com as suas absorvâncias associadas. Isto considerando o clima de São Paulo tanto atual quanto dos cenários futuros analisados. Igualmente ficou em evidência a importância da baixa transmitância da cobertura, garantida pelo isolamento e pela presença de forro. As venezianas nas esquadrias também mostraram-se muito importantes, em especial para os quartos, pois todos os casos analisados consideraram o uso de venezianas nos quartos. Contudo, as venezianas na área de sala de estar/cozinha indicaram que são um componente que eleva ainda mais o desempenho do conjunto. Por outro lado, uma maior ventilação nas esquadrias não apareceu como sendo tão relevante quanto as outras medidas avaliadas, conforme demonstraram os resultados alcançados nos cenários analisados. No entanto, a ventilação cruzada foi estratégia fundamental para o bom desempenho da edificação. Para a cidade de São Paulo, os resultados mostraram o caso base, prática corrente atual, com desempenho muito baixo na operação da edificação, com relação aos indicadores analisados para o cenário atual. Também foi

vista tendência a um desempenho mais baixo nos cenários climáticos futuros para os indicadores relacionados ao resfriamento/refrigeração. As medidas aplicadas mostraram um importante potencial de melhoria nos projetos hoje e nos cenários climáticos futuros, aplicando medidas de adaptação para melhoria do desempenho termoenergético na operação da edificação. Finalmente, a Tabela 36 mostra os melhores cinco casos por tipo de parede com as medidas adotadas em cada caso, e sua posição dentre os 287 casos analisados para a casa térrea unifamiliar na cidade de São Paulo. Os resultados são mostrados do caso com melhor desempenho ao caso com pior desempenho considerando todos os cenários climáticos.

Tabela 36 – Melhores cinco casos por tipo de parede para todos os cenários climáticos em SP, com suas características.

Posição	Nº Caso	α	Parede	Cobertura	Forro	Ven. estar	FV	Altura Janela
18	72	0,3	PAR1	COB10	FOR2	Sim	0,45	2,1
25	56	0,3	PAR1	COB6	FOR2	Sim	0,45	2,1
31	73	0,3	PAR1	COB10	FOR2	Sim	0,45	2,3
38	76	0,3	PAR1	COB10	FOR2	Não	0,45	2,1
39	57	0,3	PAR1	COB6	FOR2	Sim	0,45	2,3
156	16	0,3	PAR3	COB6	FOR2	Sim	0,45	2,1
157	40	0,3	PAR3	COB10	FOR2	Sim	0,45	2,1
160	17	0,3	PAR3	COB6	FOR2	Sim	0,45	2,3
161	41	0,3	PAR3	COB10	FOR2	Sim	0,45	2,3
166	136	0,6	PAR3	COB10	FOR2	Sim	0,45	2,1
153	88	0,3	PAR5	COB10	FOR1	Sim	0,45	2,1
162	90	0,3	PAR5	COB10	FOR1	Sim	0,9	2,1
164	89	0,3	PAR5	COB10	FOR1	Sim	0,45	2,3
172	92	0,3	PAR5	COB10	FOR1	Não	0,45	2,1
175	80	0,3	PAR5	COB6	FOR1	Sim	0,45	2,1
1	232	0,3	PAR8	COB10	FOR2	Sim	0,45	2,1
2	208	0,3	PAR8	COB6	FOR2	Sim	0,45	2,1
3	233	0,3	PAR8	COB10	FOR2	Sim	0,45	2,3
4	216	0,3	PAR8	COB10	FOR0	Sim	0,45	2,1
5	224	0,3	PAR8.	COB10	FOR1	Sim	0,45	2,1

Notas: PAR1 – dupla Tijolo; PAR3 – alvenaria 18; PAR5–mad.+Isol.; PAR8–Conc.+Isol.; COB6–barro; COB10–met; FOR0–PVC; FOR1–madeira; FOR2–laje.

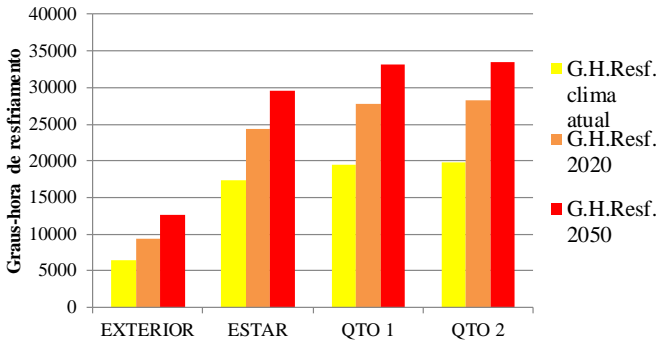
Os melhores casos de parede dupla de tijolo (PAR1) apresentaram absorvância da parede 0,3; as duas coberturas; tendo veneziana também nas esquadrias da sala de estar/cozinha (em quatro deles); forro de laje

com EPS; fator de ventilação de 0,45; e as duas alturas das janelas. Para a parede de tijolo (PAR3), os melhores casos possuíam praticamente as mesmas características do grupo anterior, com exceção de um dos casos ter absorvância das paredes externas de 0,6. A absorvância das paredes pôde ser compensada com desempenho em outros componentes. Para os casos de parede de madeira (PAR5), os melhores exemplos apresentaram na sua maioria, cobertura metálica, veneziana na sala de estar/cozinha, absorvância solar das paredes de 0,3, janelas com as duas alturas e fator de ventilação (FV) de 0,45 na maioria dos casos, com exceção de um que tinha FV de 0,90 e janelas com dimensões menores (ou seja, verga com altura 2,10 m). Os melhores casos para parede em concreto com isolante (PAR8) mostraram absorvância solar de 0,3, as duas coberturas, os três tipos de forros, fator de ventilação de 0,45 e as duas alturas das janelas.

6.2.4 Resultados para a cidade de Salvador

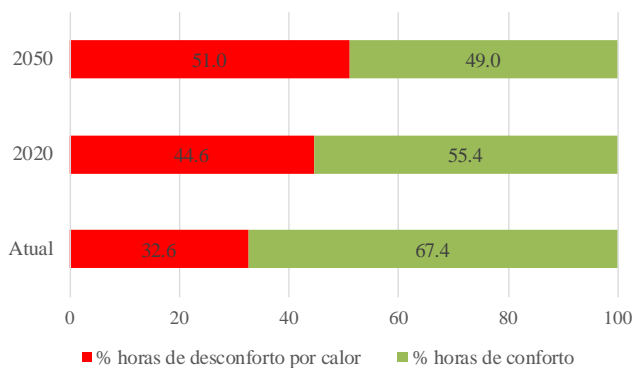
Para a cidade de Salvador, por causa da extensão do trabalho os resultados serão apresentados de forma mais simplificada, considerando, o caso base, todas as estratégias propostas de forma isolada e, posteriormente os resultados das medidas em conjunto. A Figura 86 mostra a avaliação para os indicadores de graus-hora de resfriamento por ambiente e horas de desconforto por calor para a habitação.

Figura 86 – Indicadores para a operação com ventilação natural para o caso base em Salvador nos três cenários climáticos.



a) Graus-hora de resfriamento

Figura 86 (continuação).

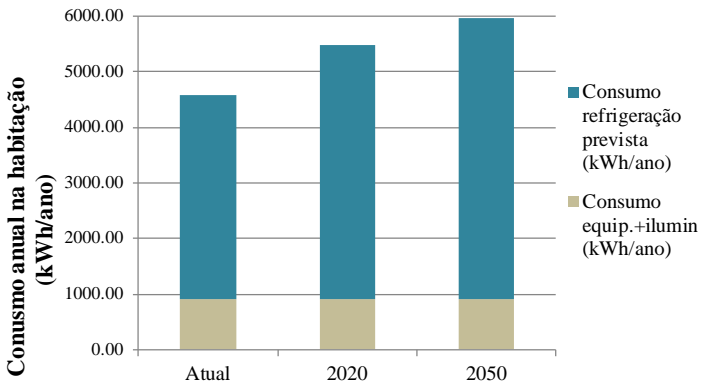


b) porcentagem de horas de desconforto por calor

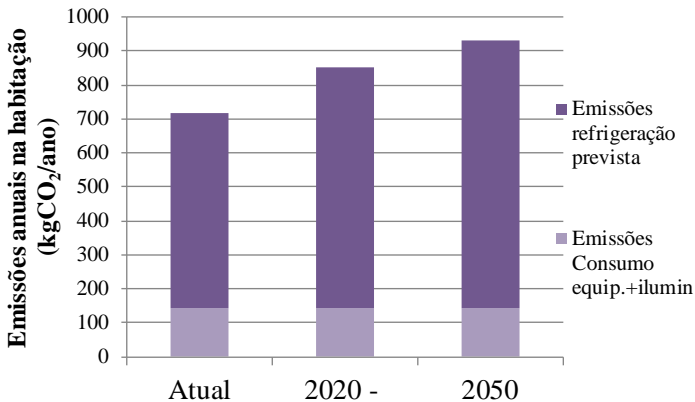
Na cidade de Salvador, o caso base na orientação com azimute 180° apresentou média ponderada para a habitação de 18.321 graus-hora de resfriamento no cenário climático atual, 25.983 no cenário de 2020 ou seja, um aumento de 41% e, 31.197 no cenário de 2050, ou seja, um aumento de 70% com relação ao cenário considerado atual. Nos ambientes, de forma individual, os quartos exibiram desempenho mais baixo do que a sala de estar (Figura 86a), o que pode ser atribuído em grande parte à orientação por conta de estarem mais expostos a oeste (Figura 54a). Isso significa passar na unidade de 32% de horas de desconforto no clima atual para 51% no cenário de 2050 (Figura 86b), levando em conta o método adaptativo da ASHRAE 55, as horas ocupadas e a média ponderada por área dos ambientes de maior permanência. Igualmente, as horas de conforto foram reduzidas de 67% no cenário atual para 49% no cenário de 2050.

Para a habitação com uso de condicionamento ambiental, o consumo energético previsto para refrigeração e as emissões de CO_2 por conta da refrigeração mostraram tendência diferente ao caso base na cidade de São Paulo. A Figura 87 mostra os resultados da avaliação desses indicadores para Salvador levando em consideração a média ponderada pelos ambientes avaliados.

Figura 87 - Indicadores para a operação com condicionamento ambiental no caso base em Salvador nos três cenários climáticos.



a) Consumo previsto para refrigeração, iluminação e equipamentos



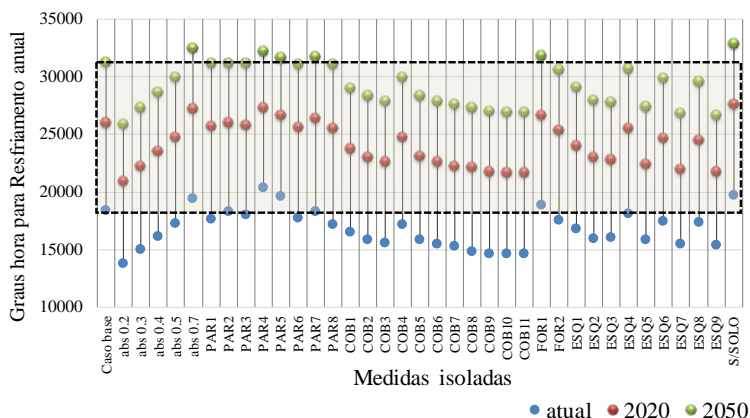
b) Emissões por conta do consumo previsto

No cenário climático atual para Salvador, o consumo por conta da refrigeração prevista representou em torno de quatro vezes o consumo de iluminação e equipamentos. Essa diferença ampliou-se com os cenários de clima futuro, uma vez que o consumo com equipamentos e iluminação foi mantido fixo. Para o cenário de 2050, o consumo de condicionamento artificial previsto ficou em torno de 5,5 vezes o consumo com equipamentos e iluminação. Entretanto, a diferença de aumento no consumo previsto de refrigeração observada entre os cenários climáticos foi menor do que a observada na cidade de São Paulo. O

consumo previsto com refrigeração foi de 3.675 kWh/ano para o cenário climático atual, 4.556 kWh/ano para 2020 e 5.043 kWh/ano para 2050. Ou seja, conforme os resultados passaria de 92,47 kWh/(m²/ano) no cenário atual a 126,89 kWh/(m²/ano) no cenário de 2050, de consumo por conta da refrigeração. Isso significou aumento de aproximadamente 37% entre o cenário climático atual e o de 2050. No consumo total, incluindo equipamentos e iluminação, os resultados foram 4.591 kWh/ano para o cenário atual, 5.472 kWh/ano para 2020 e 5.960 kWh/ano para 2050, ou seja, passaram de uma média mensal em torno de 382 kWh/mês no cenário atual, 456 kWh/mês para 2020 e 496 kWh/mês para 2050.

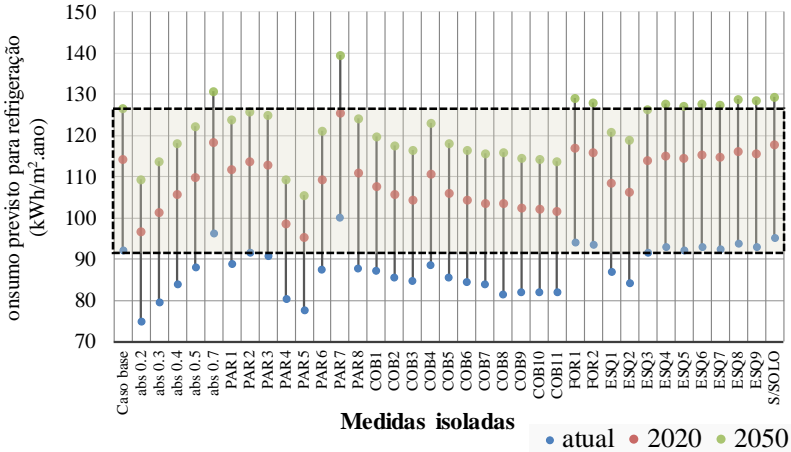
Por sua parte, as emissões do caso base na cidade de Salvador para os diferentes cenários climáticos foram estimadas em 14,42 kgCO₂/(m²/ano) para o cenário climático atual, 17,88 kgCO₂/(m²/ano) para 2020 e 19,79 kgCO₂/(m²/ano) para 2050, valores superiores aos estimados na cidade de São Paulo. A seguir são exibidos os resultados de todas as medidas de adaptação simuladas de forma isolada. A Figura 88 mostra o resultado com relação aos graus-hora de resfriamento anuais; a Figura 89 com relação ao consumo de refrigeração previsto em kWh/(m²/ano); e a Figura 90 os resultados das emissões anuais de CO₂ por conta do consumo previsto para refrigeração em kgCO₂/(m²/ano). Novamente é destacado em linha tracejada o intervalo que ocupa o desempenho do caso base nos três cenários climáticos em análise para comparação com as medidas de adaptação adotadas.

Figura 88 – Resultados das medidas de adaptação isoladas para a habitação em Salvador na operação com ventilação natural.



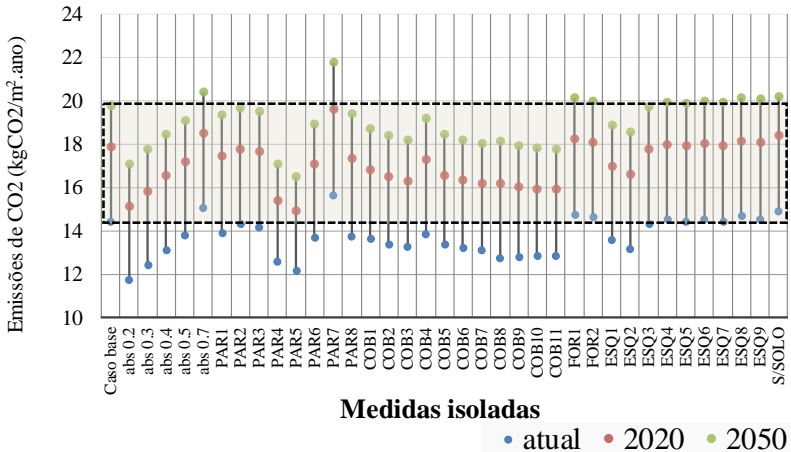
Nota: Graus-hora de resfriamento anual nos três cenários climáticos.

Figura 89 – Resultados das medidas de adaptação isoladas em Salvador na operação com uso de AVAC.



Nota: Consumo previsto para refrigeração.

Figura 90 – Resultados das medidas de adaptação isoladas em Salvador com relação às emissões de CO₂ na operação.



De forma geral, as medidas que representaram melhor desempenho em relação ao caso base nos indicadores analisados e considerando os três cenários climáticos foram as relacionadas às paredes com absorvância solar mais baixa, às coberturas com isolamento e/ou absorvância solar mais baixa e às esquadrias com sombreamento. Por outro lado, as medidas

que tornaram pior o desempenho do caso base nos indicadores analisados foram absorvância solar de paredes maior do que a considerada no caso base, ou seja, de 0,7; o uso de paredes em concreto sem isolante e a edificação sem contato com o solo.

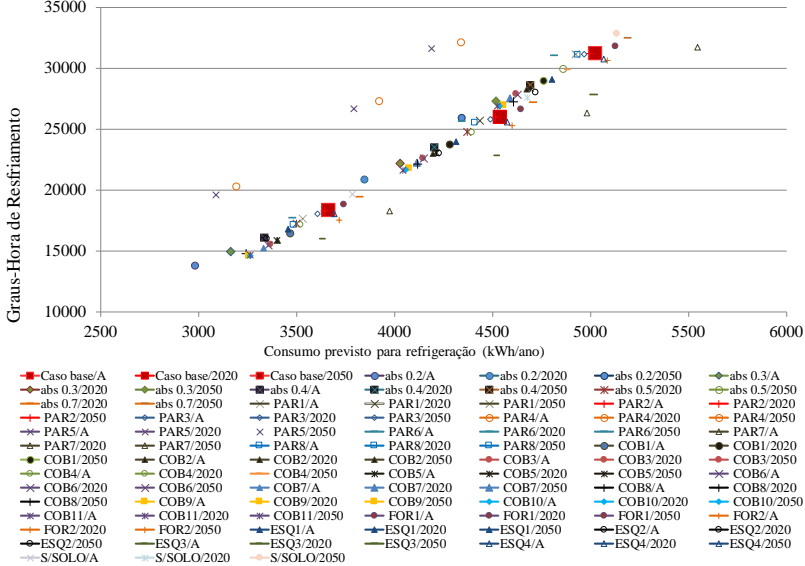
De forma mais específica em cada grupo de medidas, as paredes avaliadas não mostraram desempenho muito diferente com relação ao caso base, com algumas exceções. As paredes de concreto sem isolamento (PAR7), conforme mencionado, pioraram o desempenho nos indicadores propostos, em especial no quesito de condicionamento ambiental. Por outro lado, as paredes de madeira (PAR4 e PAR5) proporcionaram aumento dos graus-hora de resfriamento; entretanto, diminuíram consumo da refrigeração prevista e suas emissões de CO₂. Todas as coberturas propostas melhoraram o desempenho em todos os indicadores, sendo maior a redução para as coberturas com isolamento e menor absorvância solar. No cenário climático atual, a maior espessura do isolamento representou um desempenho melhor, principalmente, no indicador de graus-hora de resfriamento. No entanto, no futuro essa condição tendeu a desaparecer, mostrando comportamento muito semelhante, especialmente no indicador de refrigeração entre as coberturas metálicas, por causa da sua baixa absorvância solar.

Nos forros observou-se comportamento muito semelhante com relação ao caso base, com pouca variação entre os indicadores.

Nas esquadrias propostas, as medidas avaliadas de sombreamento exibiram melhoria significativa nos três indicadores conforme já mencionado. Outras medidas mostraram melhorias também significativas para o indicador de graus-hora, entre elas o fator de ventilação de 90%. Quando esse fator de ventilação maior encontrou-se aliado a janelas maiores, observou-se desempenho ainda melhor no indicador de graus-hora, em especial nos cenários climáticos futuros. Contudo, janelas com maior dimensão e sem fator de ventilação maior não apresentaram diferença significativa com relação ao comportamento do caso base. Para o indicador de consumo energético de refrigeração e emissões de CO₂ previstas, as medidas que se mostraram efetivas foram as de sombreamento. As outras medidas analisadas com relação às esquadrias mantiveram o comportamento muito similar ao caso base para esses indicadores. Finalmente, a edificação em contato com o solo apresentou-se relevante para o indicador de graus-hora de resfriamento. Para o indicador de consumo energético e emissões previstas por causa da refrigeração, observou-se aumento com relação ao caso base da edificação sem contato com o solo; contudo, não foi significativo.

A Figura 91 mostra a relação entre os indicadores de graus-hora para resfriamento e consumo de refrigeração considerando todas as medidas avaliadas nos três cenários climáticos.

Figura 91 – Relação entre graus-hora de resfriamento e consumo previsto de refrigeração para todas as medidas avaliadas nos três cenários climáticos.



Há uma tendência para uma relação linear entre os indicadores de graus-hora de resfriamento e consumo previsto para refrigeração na maioria das medidas adotadas, com exceção para as paredes de madeira com e sem isolamento, a parede de concreto sem isolamento e as esquadrias com fator de ventilação maior.

Para as análises das medidas de adaptação aplicadas em conjunto em Salvador foram também escolhidas as medidas que representaram melhor desempenho conforme exibido na Tabela 37. Foram avaliadas no total 47 opções de combinação de medidas nos três cenários climáticos, considerando as duas formas de operação da edificação. Isso resultou em 282 simulações. No **Apêndice D** encontra-se a lista com os casos analisados em Salvador e as medidas adotadas para cada caso. Todas as simulações assumiram a orientação no azimute 0° representando uma das estratégias consideradas. Igualmente adotou-se a edificação em contato com o solo e o uso de venezianas nos quartos para todos os casos, sendo avaliada a opção de sombreamento também nas janelas da sala de

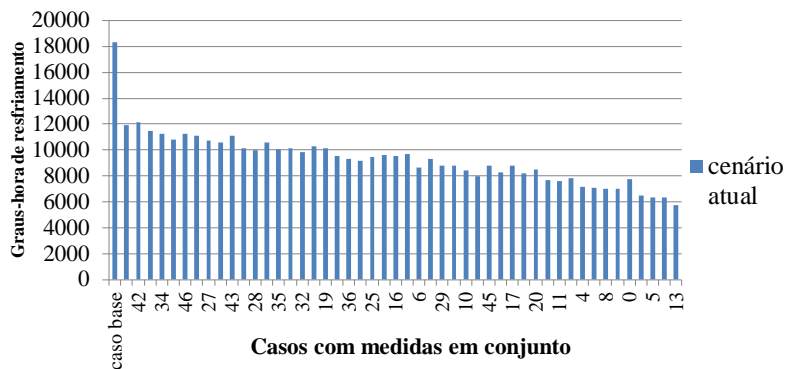
estar/cozinha. Para os casos com paredes de madeira foi avaliada somente a opção com forro de madeira. Para Salvador foram assumidas algumas diferenças nas esquadrias com relação ao caso de São Paulo. Para todos os casos com medidas, todas as esquadrias foram consideradas com altura 20 cm maior, ou seja altura das janelas em 2,30m. Por outro lado, o peitoril da sala de estar/cozinha foi considerado em 0,80 cm, ou seja, 30 cm menor do que no caso em São Paulo.

Tabela 37 – Variáveis analisadas na simulação em conjunto para os três cenários climáticos em Salvador.

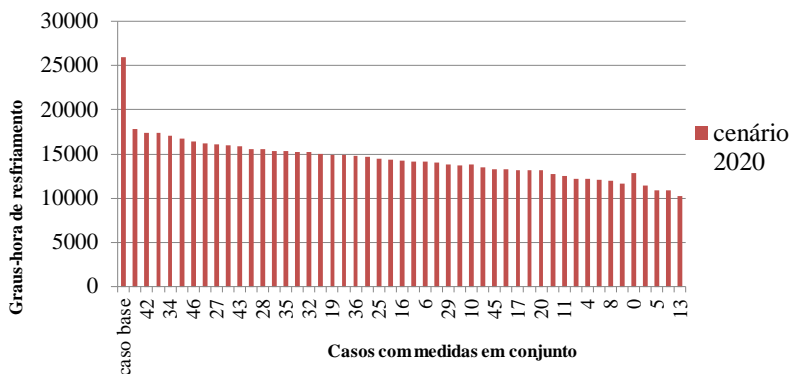
Orientação	Azimute 0°
Absortância	ABS0,3 ABS0,6
Parede	PAR2_ Alvenaria 15cm com tijolo de 8 furos e reboco interno e externo
	PAR5_ parede de madeira dupla com isolante
Cobertura	COB6_ telha de barro clara com isolante 5cm
	COB10_ cobertura metálica com isolante 5cm
Forro	FOR0_ Forro PVC
	FOR1_ Forro madeira
	FOR2_ Forro de laje com EPS
Venezianas	ESQ1_ Venezianas nos quartos (assumido em todas as simulações)
	ESQ2_ Venezianas nos quartos e sala de estar/cozinha
Fator de ventilação para sala de estar/cozinha e quartos	ESQ0_0,45 ESQ3_0,90
Altura verga esquadrias	ESQ6_2,30m (assumido em todas as simulações)
Altura peitoril cozinha	ESQ4_0,80m (assumido em todas as simulações)
Edificação em contato com o solo	CS_Edificação em contato com o solo (assumido em todas as simulações)

Para melhor visualização das reduções obtidas com as medidas de adaptação propostas nos três cenários climáticos são exibidas algumas figuras. A Figura 92 apresenta os resultados com relação aos graus-hora para resfriamento para cada cenário climático. Os casos são apresentados em ordem decrescente, partindo da esquerda do caso base, - ou pior desempenho - até o caso à direita com melhor desempenho.

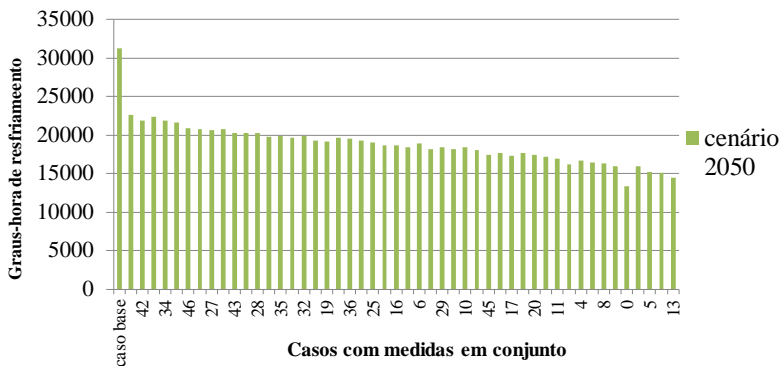
Figura 92 – Indicador na operação da edificação com ventilação natural nos três cenários climáticos em Salvador.



a) Graus-hora de resfriamento no cenário atual



b) Graus-hora de resfriamento no cenário 2020



c) Graus-hora de resfriamento no cenário 2050

Para o indicador de graus-hora de resfriamento, no cenário climático atual observaram-se reduções com a incorporação de medidas de adaptação entre 33% e 68% em comparação ao caso base. No cenário de 2020 as reduções foram de 31% a 60%; e no cenário de 2050 de 27% a 53%. Os três melhores casos para redução de graus-hora apresentaram parede em alvenaria com absorvância solar 0,3; venezianas na sala de estar/cozinha além dos quartos; e fator de ventilação de 90%. Dois dos casos tinham cobertura metálica, enquanto um deles tinha telha de barro. Com relação ao forro, exibiram tanto forro em PVC quanto laje com EPS.

Os resultados para a edificação com uso de AVAC podem ser vistos na Figura 93, igualmente em forma decrescente do caso base ao melhor caso. Mostra-se o indicador de consumo para refrigeração.

Figura 93 – Indicador na operação da edificação com uso de AVAC nos três cenários climáticos em Salvador

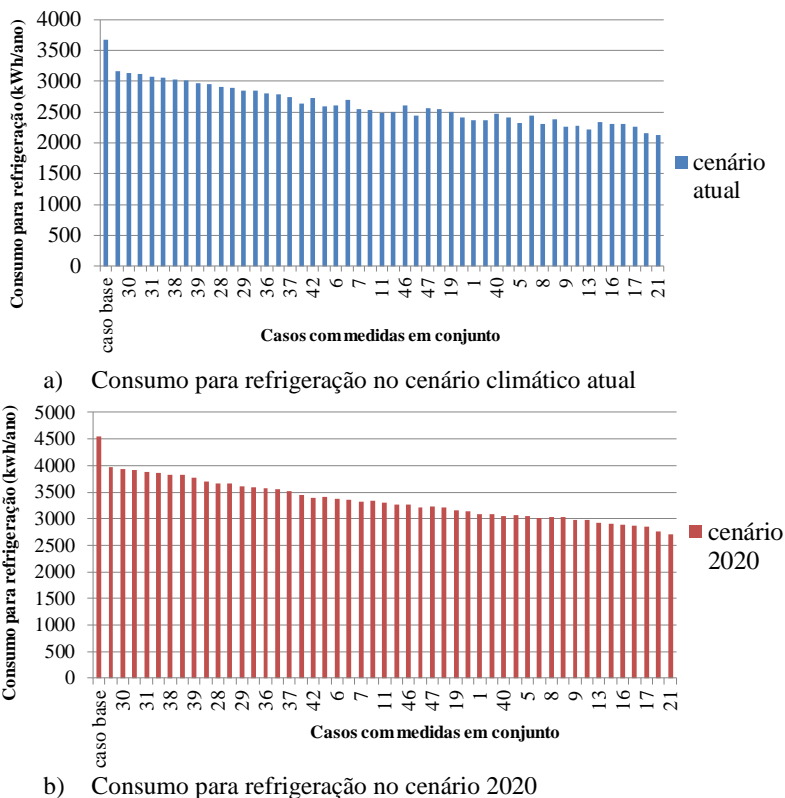
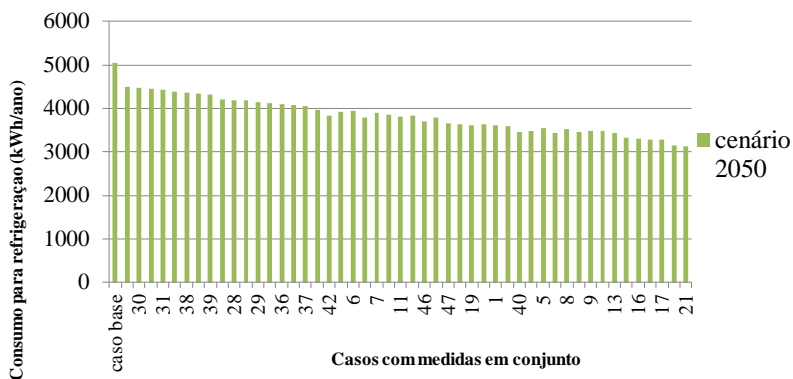


Figura 93 (continuação)

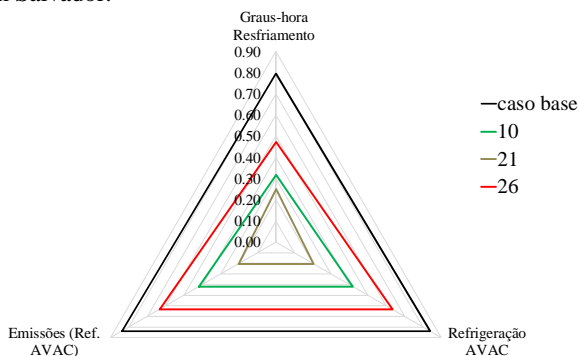


c) Consumo para refrigeração no cenário 2050

Para consumo energético e emissões de CO₂ para refrigeração, as reduções máximas observadas ficaram em torno de 40% e as mínimas em torno de 12%. Para esses indicadores, os três melhores casos tinham venezianas nas janelas da sala de estar/cozinha, além dos quartos; forro de madeira; e parede de madeira dupla com isolante de absorvância 0,3. Dois dos casos tinham cobertura com telha metálica e isolante 5 cm e dois possuíam fator de ventilação de 90%.

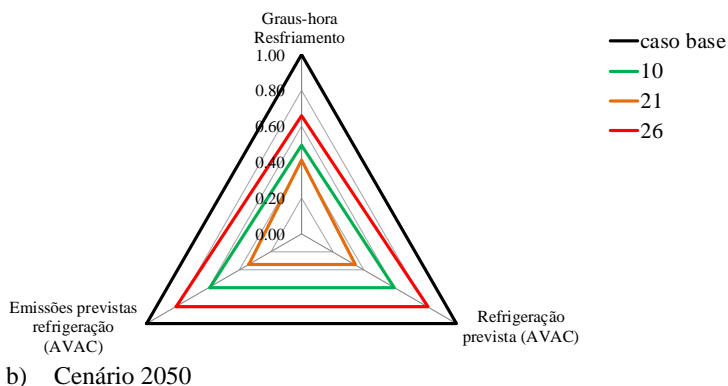
Alguns resultados dos casos com os indicadores normalizados são mostrados na Figura 94 considerando o cenário climático 2020 e 2050, respectivamente. O caso base é representado pela linha preta, enquanto os casos avaliados, pelas linhas coloridas.

Figura 94 – Medidas em conjunto com todos os indicadores normalizados para a habitação em Salvador.



a) Cenário climático 2020

Figura 94 (continuação)



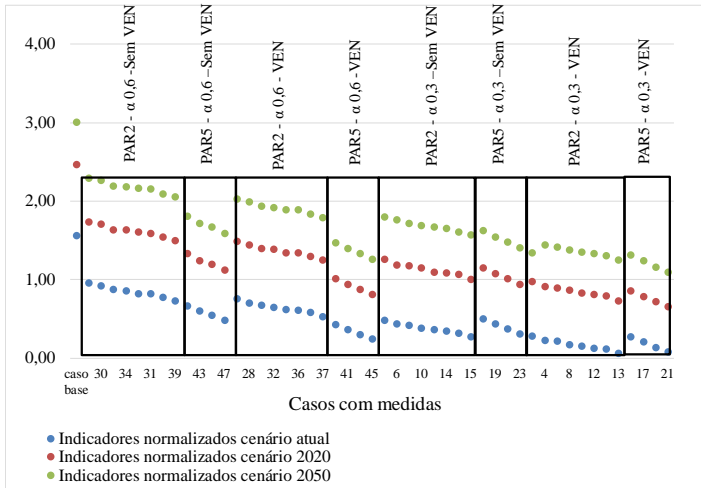
Diferentemente de São Paulo, os três cenários climáticos mantiveram a mesma tendência no comportamento. O caso base apresentou o desempenho mais baixo em todos os indicadores e cenários climáticos analisados. Observou-se redução com relação ao caso base; entretanto, não tão drástica quanto a observada nos casos avaliados na cidade de São Paulo. E, proporcionalmente, as maiores reduções foram verificadas no cenário climático atual.

Por último, a Figura 95 exibe a soma de todos os indicadores normalizados para cada cenário climático. Os casos são identificados por tipo de absorvância da parede e presença ou não de venezianas nas janelas da sala de estar/cozinha. Os grupos foram divididos por tendência de desempenho, indicando-se às características comuns. Cada ponto representa um caso em cada cenário.

Para Salvador, e considerando a soma de todos os indicadores normalizados, observaram-se as medidas que mais contribuíram para a melhoria do desempenho da edificação como a absorvância solar baixa das paredes, o uso do sombreamento nas esquadrias dos quartos e na sala de estar/cozinha. O tipo de parede mostrou uma influência menor nesta cidade; e a diferença de São Paulo a edificação com paredes em madeira teve melhor desempenho, pois a baixa capacidade térmica da parede é mais adequada para as condições climáticas de Salvador. As duas coberturas analisadas tinham isolamento e não apresentaram diferenças significativas no desempenho. Portanto, considera-se que o uso do isolamento foi mais significativo para a cobertura nesta cidade. Os forros, igualmente não mostraram diferenças significativas entre eles. O fator de ventilação, tanto de 45% quanto de 90%, mostrou casos com bom

desempenho em igual proporção. E o tamanho maior das janelas, assumido em todas as simulações, também foi favorável para o melhor desempenho da edificação.

Figura 95 – Todos os indicadores nos três cenários climáticos para a habitação em Salvador.



Nota: O agrupamento considera o tipo e absorvância das paredes externas e presença ou não de veneziana na sala de estar/cozinha.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na segunda etapa, foi realizada a análise da incorporação de medidas de eficiência energética, avaliando a adaptação às mudanças climáticas no projeto da casa unifamiliar térrea, para as cidades de São Paulo e Salvador. Os resultados nas duas cidades mostraram grande potencial atual e futuro com a aplicação das medidas para a melhoria no desempenho termoenergético operacional dos projetos que estão sendo construídos de habitação de interesse social. As análises isoladas indicaram o grau de influência de cada medida na edificação. Entretanto, a análise das medidas em conjunto demonstrou que melhorias mais significativas podem ser alcançadas com a sua combinação em detrimento de medidas isoladas. Foram verificados alguns comportamentos diferentes por cenário climático. De forma geral, com relação aos resultados nesta etapa, podem ser levantadas as seguintes considerações:

1. Considerando os cenários de mudanças climáticas, observou-se tendência de aquecimento nos climas de São Paulo e Salvador, com

o aumento acentuado nos indicadores relacionados às necessidades de resfriamento e refrigeração. Proporcionalmente, o aumento observado foi maior para São Paulo, sendo maior para Salvador em valores absolutos.

2. Para casas com ventilação natural, forma de operação predominante no país, o problema maior demonstrou ser manter um desempenho adequado por conta do aquecimento observado nos cenários de clima futuro. O caso base teve aumento significativo nos indicadores relacionados à necessidade de resfriamento, refrigeração e desconforto por calor para os cenários climáticos futuros, tanto em São Paulo quanto em Salvador. Por outro lado, observou-se redução nos indicadores ligados ao aquecimento para a cidade de São Paulo.
3. Em São Paulo, o caso base mostrou aumento nas horas de desconforto por calor de 129% e uma redução nas horas de desconforto por frio de 90%, quando comparado o cenário climático atual com o de 2050. Igualmente, comparando esses mesmos cenários, a análise energética mostrou aumento de 140% para refrigeração, sendo esse consumo predominante em todos os cenários climáticos. As emissões para refrigeração passaram de 2,98 kgCO₂/(m²/ano) para 7,16 kgCO₂/(m²/ano) no cenário de 2050.
4. Para a edificação unifamiliar térrea na cidade de São Paulo, na avaliação das medidas isoladas, maiores reduções nos indicadores avaliados foram observadas no cenário climático atual do que no cenário de 2050. Nas medidas de adaptação analisadas de forma isolada o indicador de graus-hora de resfriamento mostrou reduções entre 55% e 3% no cenário climático atual, e até 37% e 4% no cenário de 2050. Tiveram maior destaque por seu grau de eficácia nos três indicadores analisados, medidas relacionadas às mudanças nas paredes, em especial o uso de parede dupla e paredes com isolante externo, assim como coberturas com o uso de isolamento e menor absorvância solar. Algumas medidas como as relacionadas à baixa absorvância solar das paredes mostraram-se mais efetivas nos cenários climáticos futuros do que no atual, por conta do aquecimento no clima futuro. Em segundo lugar, medidas como sombreamento nas esquadrias, foram especialmente importante nos quartos. Sombreamento para todos os ambientes de permanência prolongada mostrou desempenho superior, porém, a diferença não foi tão significativa para a cidade de São Paulo. As reduções observadas nas medidas de sombreamento de forma isolada foram em torno de 10% e 15%, constantes nos três cenários climáticos. As reduções das

medidas isoladas para o consumo de AVAC foram menores do que para a operação com ventilação natural. As maiores reduções nesses indicadores foram de 40% para o cenário climático atual e 28% para 2050. Por outro lado, medidas que pioraram o desempenho com relação ao caso base foram encontradas na edificação sem contato com o solo e com o uso de forro de madeira. Contudo, alterações no forro não tiveram mudanças relevantes. Igualmente, as paredes de madeira aumentaram significativamente os indicadores para a operação com ventilação natural, em especial para graus-hora de resfriamento; porém tiveram um comportamento similar ao caso base nos indicadores para operação com uso de AVAC. Esquadrias com fator de ventilação maior e maiores dimensões não apresentaram efeito tão contundente para essa cidade, como outras medidas.

5. Nas análises das medidas em conjunto foi possível obter bons desempenhos com muitas combinações. Para São Paulo, os componentes que mostraram maior relevância foram, principalmente, o tipo de parede e coberturas com as suas propriedades associadas. No caso da cobertura, foi importante a baixa transmitância térmica garantida pelo isolamento e pela presença do forro. Para essa cidade, o tipo de parede mostrou uma tendência significativa no comportamento da edificação. A maior ventilação nas esquadrias não foi muito relevante, mas sim a ventilação cruzada. Ainda para São Paulo, todas as medidas selecionadas para serem aplicadas em conjunto mostraram melhorias na maioria dos indicadores, com exceção de algumas medidas nos indicadores de aquecimento. No indicador de consumo energético para refrigeração, a redução alcançada pelas medidas de adaptação em conjunto na cidade de São Paulo mostrou variação conforme cenário. Sendo entre 32% e 69% para 2050. As maiores reduções foram no cenário atual, por conta das temperaturas mais elevadas observadas nos cenários futuros.
6. Para o caso da edificação unifamiliar térrea na cidade de Salvador, as horas de desconforto por calor no caso base tiveram aumento de 56% comparando o cenário de 2050 com o atual. As medidas isoladas mostraram reduções menores em porcentagem do que na cidade de São Paulo. Isso por conta do clima de Salvador já ter temperaturas mais elevadas e mostrar menor diferença comparativamente entre os cenários climáticos do que São Paulo. Para o indicador de graus-hora de resfriamento as maiores reduções com as medidas isoladas propostas foram de 25% para o cenário climático atual e 17% para o de 2050. As medidas de adaptação que tiveram maior destaque por

seu grau de eficácia nos três indicadores foram aquelas relacionadas à baixa absorvância solar das paredes; coberturas com isolamento e baixa absorvância solar; e sombreamento das esquadrias, considerando todos os ambientes de permanência prolongada. Medidas de adaptação relacionadas às esquadrias, tanto no aumento das dimensões quanto no fator de ventilação, mostraram-se eficazes para a operação com ventilação natural. Por outro lado, as alterações propostas nas paredes não tiveram mudanças significativas com relação ao caso base; entretanto, os tipos de paredes analisados demonstraram, por vezes, comportamentos muito diferentes conforme o indicador avaliado. As paredes de madeira tiveram desempenho inferior ao caso base para os graus-hora de resfriamento, em especial no cenário atual, ficando similar ao caso base no cenário de 2050. Contudo, no indicador de consumo energético e emissões essas paredes demonstraram desempenho significativamente superior ao caso base. Por outro lado, medidas como parede em concreto sem isolante mostraram baixo desempenho, sendo o pior desempenho das medidas analisadas para a edificação com o uso de AVAC, o que coloca-se como um problema, por observar-se como sendo uma prática atual recorrente.

7. Para Salvador, nas medidas de adaptação incorporadas em conjunto, as que mais contribuíram para os casos com melhor desempenho foram, a absorvância solar baixa das paredes e o uso do sombreamento em todos os ambientes de permanência prolongada. O tipo de parede demonstrou uma menor influência. Os dois tipos de coberturas avaliadas nas análises em conjunto (telha de barro e metálica) não apresentaram diferenças significativas, considerando-se, assim, mais importante o uso do isolamento. Os tipos de forros também não mostraram diferenças expressivas. O aumento no tamanho das janelas foi mais relevante para a melhoria do desempenho do que o aumento no fator de ventilação.
8. Para ambas as cidades, o uso do isolamento na cobertura apareceu como uma medida muito efetiva. Para São Paulo, a espessura do isolante nas coberturas não mostrou diferença significativa na maioria dos indicadores, sendo mais perceptíveis para o indicador de aquecimento na operação com ventilação natural. Para Salvador, em coberturas com baixa absorvância solar (0,3), a espessura do isolamento não apresentou nenhuma diferença entre os indicadores avaliados.

9. O uso de isolamento externo nas paredes para a cidade de São Paulo mostrou tendência a uma melhoria expressiva do desempenho nos indicadores avaliados nos três cenários climáticos; entretanto, para Salvador, o isolamento externo nas paredes não indicou melhorias significativas. Contudo, deve ser observado que as simulações do comportamento termoenergético da edificação foram realizadas considerando-se um tipo de usuário que mostra um controle adequado de abertura de janelas e dispositivo de sobreamento, sendo importante análises com outros comportamentos de usuários para estratégias que queiram ser aprofundadas em maior detalhe, em especial as que envolvam isolamento em paredes com maior capacidade térmica, como é o caso da parede de concreto.
10. As medidas de adaptação aplicadas em conjunto mostraram potencial para melhorar o desempenho do caso base no cenário de 2050, quando comparado no cenário climático atual, para ambas as cidades.
11. Os resultados mostraram tendências de comportamento para os cenários futuros analisados estabelecidos conforme previsões pelo IPCC. Igualmente ficou em evidência a importância de analisar medidas de eficiência energética nos projetos considerando cenários climáticos futuros. Dada a incerteza atual nos cenários climáticos futuros, sugere-se que as informações sejam tratadas dessa forma, ou seja, como tendência, e não como valores absolutos.
12. O estudo realizado nesta etapa da pesquisa apresentou como o *business as usual* do que está sendo construído hoje nos programas de habitação de interesse social deve ser revisto, tendo-se em consideração as mudanças climáticas. Isso mostrou oportunidade importante para melhoria dos projetos de HIS atual e no futuro.

A análise realizada até o momento levou em consideração somente a etapa de operação da edificação. Levando-se em conta o tripé da sustentabilidade com o conceito do ciclo de vida, foi realizada na etapa seguinte uma avaliação mais holística de alguns casos. Para tanto, foram adotados além dos indicadores incluídos nesta etapa, outros indicadores, abordados diante do ciclo de vida da edificação. Para cada cidade, foram escolhidos quatro casos que tivessem alcançado bom desempenho na avaliação realizada nesta etapa, e que igualmente tivessem diversidade de materiais e opções nos seus componentes. Os casos escolhidos para São Paulo e Salvador com as medidas adotadas serão descritos em maior detalhe no próximo capítulo. Esses casos foram comparados com o caso base na última etapa da pesquisa, descrita a seguir.

7. ABORDAGEM INTEGRADA PARA AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS PROJETOS DE HIS

A revisão de literatura indicou uma carência com relação a avaliações que apresentem uma abordagem mais holística para o uso da energia e do desempenho termoenergético no ciclo de vida das habitações de interesse social no Brasil. Dessa forma, a terceira e última etapa desta pesquisa propôs a avaliação da incorporação das medidas de eficiência energética no projeto representativo de habitação de interesse social no país no nível de renda 1, por meio de uma abordagem integrada que agregue os conceitos de mudanças climáticas, ciclo de vida do edifício e aspectos do tripé da sustentabilidade; tendo como foco o desempenho termoenergético da edificação.

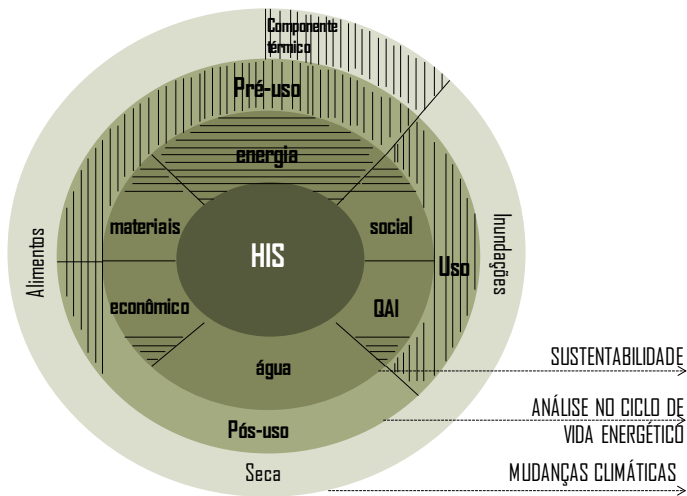
As mudanças climáticas podem abarcar muitos enfoques, porém o enfoque aqui abordado considerou ao igual que na etapa anterior, os parâmetros presentes na integração com a simulação termoenergética na etapa de operação da edificação.

No ciclo de vida das edificações, foram consideradas três fases (pré-uso, uso e pós-uso). Entretanto o foco foi maior nas duas primeiras, pois, mesmo que todas as fases apresentem incertezas associadas, na fase de pós-uso estas tendem a ser maiores. Por outro lado, as etapas associadas a cada fase foram as que mostraram maior relevância para o foco pretendido na revisão de literatura. Questões relacionadas à sustentabilidade nas edificações devem incluir aspectos ambientais, sociais e econômicos. Assim, foram incluídos aspectos considerados das três vertentes relacionados ao desempenho termoenergético da edificação. A avaliação integrada teve os projetos de habitações de interesse social como objeto de estudo. A Figura 96 ilustra o marco conceitual da abordagem proposta.

A abordagem integrada proposta considerou definições de autores como Kloepffer (2008) em relação à avaliação de sustentabilidade no ciclo de vida (Life cycle sustainability assessment – LCSA) assim como a normativa europeia proposta pela TC350 do CEN. Dessa forma, buscou-se quantificar impactos relacionados ao desempenho termoenergético do edifício, avaliando aspectos da sustentabilidade com base em metodologias que consideram o ciclo de vida. Alguns pré-requisitos foram observados, como apresentar fronteiras dos sistemas consistentes entre todas as avaliações e cenários de mudanças climáticas, mantendo um único inventário do ciclo de vida.

Figura 96 – Marco conceitual da abordagem proposta.

SUSTENTABILIDADE (ENERGIA) + CONCEITO DO CICLO DE VIDA + MUDANÇAS CLIMÁTICAS



Nota: QAI = Qualidade ambiental interna

Para a abordagem integrada proposta foram considerados indicadores relacionados aos aspectos do tripé da sustentabilidade e ao desempenho termoenergético da edificação e, que fossem relevantes para as mudanças climáticas. A avaliação do ciclo de vida energético foi adotada para a avaliação do desempenho ambiental/energético. Para isso, foram considerados como indicadores de desempenho, exclusivamente o consumo energético e as emissões de CO₂ no ciclo de vida. Reconhece-se que podem ter-se muitos outros indicadores do desempenho ambiental da edificação, entretanto foi limitado aos dois mencionados por ser realizada uma avaliação do ciclo de vida energético e não uma ACV completa. Igualmente por esses indicadores aparecerem na revisão de literatura como sendo relevantes quando são abordadas mudanças climáticas. De outro lado, somente foram consideradas emissões de CO₂ e não de CO₂ equivalente, pela falta de dados da segunda no cenário nacional.

O indicador de desempenho no aspecto econômico foi o custo no ciclo de vida. E para os aspectos relacionados ao conforto do usuário, os graus-hora de desconforto de resfriamento e aquecimento da edificação foram selecionados como indicador. Este indicador foi escolhido pelas

razões apresentadas na etapa anterior da pesquisa. Reconhece-se que aspectos sociais na edificação incluem normalmente muitas outras questões diferentes das aqui abordadas. Entretanto, coloca-se um indicador que mede o desempenho da edificação com ventilação natural, na medida em que o mesmo não implica impacto nos recursos, meio ambiente ou custo econômico. Contudo, está ligado ao grau de satisfação do usuário com o desempenho da habitação. É neste sentido que considera-se nesta pesquisa como um indicador ligado ao aspecto social do desempenho termoenergético da edificação.

Os indicadores foram calculados levando-se em conta três cenários climáticos: atual e dois futuros (2020 e 2050). A escolha desses indicadores justifica-se por serem globalmente usados em comparações entre desempenhos de edificações.

A integração de todos os indicadores de desempenho junto às mudanças climáticas produziu um Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético do edifício, de forma que foi possível o estabelecimento de comparações. A metodologia proposta considerou o caso base e a proposição de estratégias de eficiência energética nos projetos considerando a vida útil da edificação. Assim, nesta etapa foram consideradas as seguintes fases:

1. Proposta de processo de abordagem integrada considerando mudanças climáticas para avaliação das medidas de adaptação com definição de indicadores e forma de avaliação, levando em conta critérios do tripé da sustentabilidade nas fases do ciclo de vida da edificação; e
2. Proposta de índice de desempenho de sustentabilidade no ciclo de vida energético.

A seguir são mostrados, inicialmente, os materiais e o método proposto para a abordagem integrada e, posteriormente, os resultados obtidos.

7.1 MATERIAIS E MÉTODO

Para a abordagem integrada proposta, são exibidos, primeiramente, os casos a serem avaliados. Posteriormente são apresentados os parâmetros gerais a todas as avaliações. Depois, os critérios e indicadores por tipo de avaliação, explicitando para cada um a forma de obtenção e os dados necessários em cada uma das fases do ciclo de vida. Finalmente, mostra-se a forma de estimativa do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto.

7.1.1 Casos avaliados

A abordagem integrada prevê a comparação do caso base com outros quatro casos que apresentaram bom desempenho com medidas de eficiência energética e foram escolhidos frente aos resultados da Etapa anterior desta pesquisa. Ao igual que na etapa anterior, os casos foram avaliados para a cidade de São Paulo e Salvador. A Tabela 38 exibe um resumo das características dos componentes do caso base para as duas cidades. Informações mais detalhadas encontram-se no **Apêndice E**.

Tabela 38 – Principais dados no caso base para ambas as cidades.

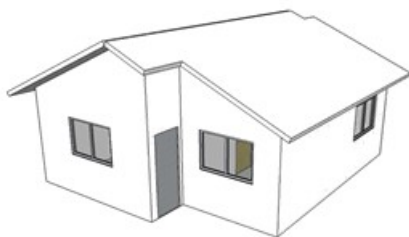
Caso base		
Vida útil	50 anos	
Áreas úteis (m²)	Área útil total	39,74 m ²
	Área total com paredes	44,99 m ²
	Sala de estar Cozinha	17,83 m ²
	Quarto 1	8,07 m ²
	Quarto 2	7,54 m ²
	Banheiro	4,09 m ²
	Espaço de circulação entre quartos	2,21 m ²
Fases do ciclo de vida	Pré–uso, uso e pós–uso	
Fase de uso	Dados da simulação termoenergética. Inclui consumo para condicionamento ambiental previsto, considerando mudanças climáticas, eletrodomésticos e iluminação artificial	
Estrutura	Vergas sobre janelas e portas; contravergas embaixo das janelas - 9x10cm (larg.xalt.) com sobrepasso na média de 20 cm nas laterais	
	Cinta de amarração em concreto sobre as paredes de 9x19cm (larg.xalt.)	
	Pilaretes nos cantos das paredes de 9x9 cm	
	Estrutura em concreto	
Paredes	Bloco cerâmico de 6 furos de 9x14x19cm	
	Reboco 2cm: 0,5cm de chapisco traço 1:3 de cimento:areia + 1,5cm de reboco com traço 1:2:9 cimento:cal:areia	
	Argamassa de assentamento 1,3cm de espessura na horizontal de 1cm na vertical traço 1:2:8 cimento:cal:areia	
	Paredes internas e externas iguais	

Tabela 38 (continuação)

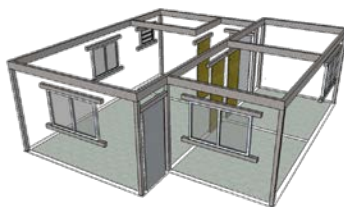
Caso base	
Cobertura	Telha colonial 44cm de comprimento com 26 telhas por m ² de telhado
	Estrutura em madeira com 0,022 m ³ de volume de madeira por m ² de telhado
	Forro em PVC
Piso	Piso em cerâmica 1cm
	Argamassa de regularização 2cm traço 1:5 de cimento:areia
	Contrapiso em concreto 5cm
	Colchão de brita 3cm
Esquadrias	Janelas e portas externas alumínio
	Portas internas em madeira oca
	Janelas sem venezianas
	Tamanho das janelas conforme projeto e altura das janelas de 2,10m
Pintura paredes	Pintura inicial 1 demão de selador e três demãos de tinta. Pintura de manutenção com uma demão em intervalos menores e duas demãos em intervalos maiores. Selador somente usado no início ou quando da reposição do componente

A Figura 97 mostra o projeto do caso base com volumetria, estrutura considerada, planta e corte.

Figura 97 – Projeto do caso base.

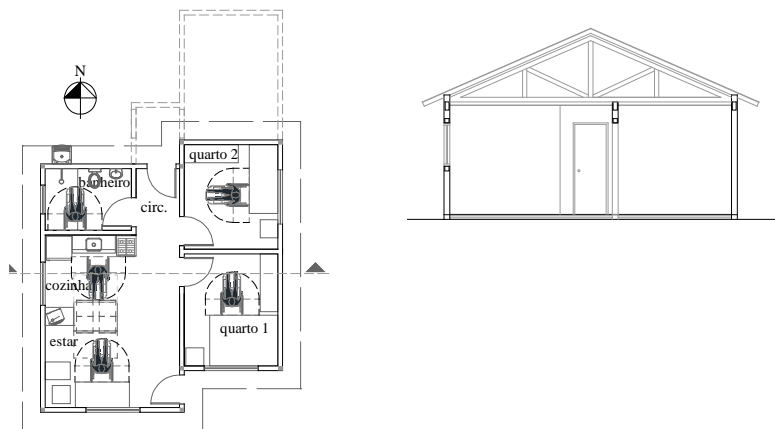


a) Volumetria



b) Estrutura

Figura 97 (continuação)



c) Planta baixa

d) Corte

Na Tabela 39 e na Tabela 40²² mostram-se, para os casos avaliados por cidade, as medidas para adaptação consideradas com componentes e materiais que diferiram do caso base. Primeiro para a cidade de São Paulo e depois para Salvador. Optou-se por todos os casos escolhidos terem o mesmo tipo de estrutura para a cobertura, sendo em madeira, igual ao caso base. Especificações diferentes teriam impactos diferenciados nas etapas de energia, emissões e custos incorporados; entretanto, isso não influencia no desempenho termoenergético na operação. Igualmente, foram escolhidos, para a avaliação, casos com a mesma absorvância externa das paredes (0,3), sendo assim considerada um parâmetro fixo. O Apêndice F mostra com mais detalhes as condicionantes assumidas para o quantitativo de materiais dos casos avaliados para São Paulo e Salvador. Os casos avaliados por cidade são identificados daqui em diante de forma numérica de 1 a 4, conforme são apresentados nas tabelas.

²² As nomenclaturas das medidas adotadas são conforme apresentado na Tabela 27 seção 6.1.3.1.

Tabela 39 – Características dos componentes para os casos avaliados em São Paulo.

São Paulo	Caso Nº			
	Caso 1 SP	Caso 2 SP	Caso 3 SP	Caso 4 SP
Orientação	Azimute 0º	Azimute 0º	Azimute 0º	Azimute 0º
Estrutura	Em madeira	Em concreto	Em concreto	Sem estrutura. Paredes autoportantes
Paredes	PAR5 – Parede dupla em madeira com isolante 5 cm	PAR3 – Alvenaria em tijolo 9 furos (14x19x19cm) reboco int. e ext., largura total 18 cm	PAR1 – Alvenaria em tijolo duplo 6 furos (9 x14 x 19cm), reboco int. e ext. Largura total 25cm	PAR8 – Parede em concreto 10 cm com isolante 2,5 cm ext. + reboco ext. 2 cm
	α parede externa 0,3	α parede externa 0,3	α parede externa 0,3	α parede externa 0,3
Cobertura	COB10 – telha met. + isolante lã de rocha 5 cm	COB6 – telha de barro cor clara (α 0,5) + isolante lã de rocha 5 cm	COB10 – telha metálica + isolante lã de rocha 5 cm	COB10 –telha metálica + isolante lã de rocha 5 cm
	Estrutura em madeira	Estrutura em madeira	Estrutura em madeira	Estrutura em madeira
Forro	FOR1 – madeira 1 cm	FOR2 – Laje concreto com EPS 12 cm	FOR1 – madeira 1 cm	FOR 2 – Laje concreto com EPS 12 cm
Esquadrias	(ESQ2) Venezianas em alumínio nas janelas dos quartos e estar/coz.	(ESQ1) Venezianas em alumínio somente nas janelas dos quartos	(ESQ1) Venezianas em alumínio somente nas janelas dos quartos	(ESQ2+ ESQ4) Venezianas em alumínio nas janelas dos quartos e estar/cozinha
	FV: 0,45	FV: 0,45	FV: 0,45	FV: 0,45
	Alt. janela: 2,10 m. Janelas iguais em dimensões ao caso base	Alt. janela: 2,10 m. Janelas iguais em dimensões ao caso base	Alt. janela: 2,10 m. Janelas iguais em dimensões ao caso base	Alt. janela: 2,30 m. Todas as janelas 0,20cm mais altas do que o caso base

Tabela 40 – Características dos componentes para os casos avaliados na cidade de Salvador.

Salvador	Caso Nº			
	Caso 1 Salv.	Caso 2 Salv.	Caso 3 Salv.	Caso 4 Salv.
Orientação	Azimute 0°	Azimute 0°	Azimute 0°	Azimute 0°
Estrutura	Em madeira	Em madeira	Em concreto	Em concreto
Paredes	PAR5 – Parede dupla em madeira com isolante 5 cm	PAR5 – Parede dupla em madeira com isolante 5 cm	PAR2 – Alvenaria em tijolo 8 furos (11x19x19 cm) largura total 5 cm	PAR2 – Alvenaria em tijolo 8 furos (11x19x19 cm) largura total 5 cm
	α parede externa 0,3	α parede externa 0,3	α parede externa 0,3	α parede externa 0,3
Cobertura	COB10 – telha metálica + isolante lã de rocha 5 cm	COB6 – telha de barro cor clara (α 0,5) + isolante lã de rocha 5 cm	COB10 – telha metálica + isolante lã de rocha 5 cm	COB6 telha de barro (α 0,5) + isolante lã de rocha 5 cm
	Estrutura em madeira	Estrutura em madeira	Estrutura em madeira	Estrutura em madeira
Forro	FOR1 – madeira 1 cm	FOR1 – madeira 1 cm	FOR0 – PVC 1 cm	FOR 2 – Laje mista em concreto com EPS 12 cm

Tabela 40 (continuação).

Salvador	Caso 1 Salv.	Caso 2 Salv.	Caso 3 Salv.	Caso 4 Salv.
Esquadrias	(ESQ2 + ESQ9) Venezianas em alumínio nos quartos e sala de estar/cozinha	(ESQ1+ESQ8) Venezianas em alumínio somente nos quartos	(ESQ2 + ESQ9) Venezianas em alumínio nos quartos e no sala de estar/cozinha	(ESQ2 + ESQ9) Venezianas em alumínio nos quartos e no sala de estar/cozinha
	Todas as janelas com fator de ventilação de 0,90	Janelas de sala de estar/cozinha e quartos com fator de ventilação de 0,45 . Banheiro com FV 0,90	Todas as janelas com fator de ventilação de 0,90	Todas as janelas com fator de ventilação de 0,90
	Todas as janelas 0,20cm mais altas que o caso base (altura 2,30m) e peitorio das janelas sala de estar/cozinha 30cm mais baixo (0,80m)	Todas as janelas 0,20cm mais altas que o caso base (altura 2,30 m) e peitorio das janelas sala de estar/cozinha 30cm mais baixo (0,80m)	Todas as janelas 0,20cm mais altas que o caso base (altura 2,30 m) e peitorio das janelas sala de estar/cozinha 30cm mais baixo (0,80m)	Todas as janelas 0,20cm mais altas que o caso base (altura 2,30 m) e peitorio das janelas sala de estar/cozinha 30cm mais baixo (0,80m)

7.1.2 Parâmetros gerais

A seguir são detalhados os parâmetros gerais comuns a todas as avaliações. Foram escolhidos para análise, exclusivamente, os materiais pertinentes ao desempenho termoenergético da edificação relacionados à envoltória limitando-se a estrutura, paredes externas e internas, cobertura, piso e esquadrias. Foram excluídos da análise instalações elétricas, hidráulicas e sistema de água quente. As fundações também foram excluídas por dependerem do terreno no qual seria implantada a

edificação. Dessa forma para todas as avaliações foram considerados os seguintes componentes da edificação (Tabela 41).

Tabela 41 – Componentes ou serviços considerados na análise da edificação.

Estrutura	Considerando a super-estrutura: vigas, pilares, lajes; excluindo a fundação
Paredes	Paredes externas
	Paredes internas
Cobertura	Telhado
	Estrutura telhado
	Forro com estrutura para apoio
Piso	Piso interno
	Laje de piso
Esquadrias	Portas
	Janelas
	Vidros
Pintura	Pintura de paredes externas
	Pintura de paredes internas
	Pintura do forro
	Pintura de portas internas

Para as avaliações relacionadas ao ciclo de vida da edificação, é importante informações com relação aos componentes e materiais usados no projeto, tais como: composição dos componentes da envoltória, quantidade dos materiais usados por componente, desperdício estimado dos materiais; dados de vida útil e dados com relação ao transporte dos materiais.

Para a obtenção de dados da quantidade de materiais, foram consideradas duas abordagens. Para o caso base obtiveram-se dados, preferencialmente com relação ao projeto representativo elaborado, o qual tomou como referência os memoriais descritivos disponíveis dos projetos fornecidos pelas companhias de habitação e agentes públicos. Por outro lado, quando não foi possível determinar a composição dos materiais, conforme os memoriais descritivos disponíveis, buscaram-se informações nas referências nacionais, preferencialmente no SINAPI e, posteriormente, na TCPO nº 14.

O Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) é divulgado pela Caixa e o IBGE de forma mensal, fornecendo de forma gratuita, composição de serviços e preços de insumos, incluindo mão de obra e equipamentos com valores, sendo os dados por estado, fornecidos em relatórios mensais por meio de

ferramenta e algumas informações disponibilizadas na internet. Na internet se tem acesso livre aos custos das composições e aos preços dos insumo. Composições mais detalhadas tiveram que ser solicitadas. Para habitações de baixa renda, deve ser usado como referência o SINAPI. As composições dos componentes mostradas do SINAPI já incluem um fator de perda ou desperdício que não é explícito, enquanto a composição dada pela TCPO mostra o fator de desperdício. O cálculo do desperdício dos materiais é importante para a identificação dessa etapa no ciclo de vida e para a comparação com resultados de outras pesquisas nacionais. Portanto, quando necessário, foram confrontadas as composições encontradas nas duas referências para estimar a quantidade do material sem perda. Para dados não disponíveis em nenhuma dessas referências, buscaram-se dados médios de fornecedores. O **Apêndice E** mostra com detalhes as condicionantes assumidas para o quantitativo de materiais do caso base e o **Apêndice F** mostra o quantitativo dos materiais para os casos com medidas de adaptação.

Para os dados de desperdício de materiais, foram considerados os dados da mediana dos indicadores globais de perdas por material com base em Agopyan (1998) e Agopyan et al. (2003). Para os materiais não encontrados nessa referência, foram adotados valores com base em fornecedores e/ou na TCPO. O **Anexo A** mostra os valores adotados para o desperdício nesta pesquisa.

Para o transporte, foram consideradas as distâncias do fabricante do material até as duas cidades escolhidas.²³ Não foi considerado o transporte dentro da cadeia. Com base no diretório disponível da internet E-Construmarket (2016), foram estimados preferencialmente três fabricantes para cada um dos materiais analisados com base no método adotado por Munarim (2014). Entretanto, diferentemente do autor, que escolheu a média entre três fornecedores, optou-se por escolher a distância do fornecedor que representava a mediana entre os três, pois dessa forma representa-se uma distância real possível. Os fornecedores foram escolhidos considerando os que apresentavam o produto pretendido e tinham distâncias menores com relação ao local hipotético da obra. Contudo, para Salvador não foram encontrados no diretório fornecedores perto de Salvador para muitos produtos. De tal forma, buscou-se o apoio do Sinduscon Salvador para verificar fornecedores usados pelas empresas associadas e validar os que estavam sendo

²³ Por conta de não se ter um local específico para a obra, foi escolhido o centro de ambas as cidades somente como referência para o cálculo das distâncias dos fornecedores.

levantados no E-Construmarket. Assim, a lista de Salvador contém fornecedores das duas fontes, mantendo-se a mediana como distância escolhida. No caso de terem-se somente dois fornecedores foi adotada a menor distância entre os dois. Da mesma forma, foi estimada a distância ao local do aterro na cidade de Salvador. Para a cidade de São Paulo, a distância ao local do aterro foi estimada conforme dados da prefeitura da cidade. Dados levantados com relação às distâncias dos fabricantes de materiais para as cidades de São Paulo e Salvador encontram-se nos **Apêndices G.1 e G.2** respectivamente.

Para a vida útil da edificação e seus componentes, foi considerada a vida útil de projeto (VUP) com base na NBR 15575 (ABNT, 2013). Para sistemas e partes da edificação encontrados de forma direta nas tabelas da NBR 15575-1,²⁴ foram adotadas as informações pertinentes com relação à VUP. Para outras partes da edificação não especificadas de forma direta, foram adotados os critérios presentes nas Tabelas C.1, C.2, C.3 e C.4 da mesma norma. De modo geral, foi adotado o critério da VUP como sendo o valor médio entre o limite mínimo e superior recomendado em anos, com ressalva de alguns materiais e componentes aqui explicitados. Essas ressalvas foram colocadas considerando a prática do mercado. Para o edifício, foi adotada a vida útil de 50 anos, recomendada para HIS; para as paredes externas e internas, foi escolhido o limite mínimo; para o telhamento, o forro, a estrutura da cobertura, as portas e janelas, foi determinado o limite máximo; e para a laje do piso e da estrutura, foi adotado o mesmo valor da vida útil da edificação. Para a pintura das paredes, foi considerada a pintura inicial com uma demão de selador e três²⁵ demãos de tinta. O **Apêndice H.1** mostra os limites da vida útil de

²⁴ Tabelas C.5 e C.6 da NBR 15575.

²⁵ Com base na composição do SINAPI. Para a pintura das paredes externas, foi estabelecida uma VUP de 10 anos, ou seja, que a cada 10 anos deve ser refeita a pintura com três demãos de tinta. Entretanto, foi prevista manutenção a cada cinco anos de uma demão de pintura. Isso significa em torno de 7,5 renovações de pintura na vida útil do edifício de 50 anos. Dessa forma, para a simplificação dos cálculos em todas as avaliações, foi utilizado o valor de sete anos de VUP para a pintura das paredes externas. Por outro lado, para a pintura das paredes internas, a VUP foi estimada em oito anos, com manutenção de uma demão a cada quatro anos. Assim, seriam necessárias 9,2 renovações na vida útil do edifício de 50 anos. Portanto, análogo ao critério utilizado para paredes externas, foi determinada a vida útil da pintura das paredes internas em cinco anos, incluindo nesse valor a manutenção prevista. A aplicação do selador esteve ligada à vida útil do componente parede. Para a pintura do teto, seguiu-se a VUP das paredes internas, porém sem aplicação de selador.

projeto mínimo e superior estabelecidos com base na NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e os valores adotados nessa abordagem proposta.

Para o levantamento dos dados e o cálculo da abordagem integrada, foi concebida uma planilha em excel na qual foram inseridas as bases de dados constituídas de forma a ser fácil a inclusão e a modificação dos valores, usando a função do excel PROCV (VLOOKUP). O conteúdo da planilha encontra-se nos apêndices e nos resultados apresentados. Optou-se pela elaboração de planilha própria em oposição ao uso de *software* específico para análises de alguns dos critérios avaliados, como por exemplo um *software* específico para a ACVE, em virtude de querer ter um maior controle dos dados, dos cálculos necessários e da abordagem proposta, assim como por causa da menor quantidade de dados e indicadores de desempenho considerados. A seguir detalham-se as avaliações adotadas na abordagem proposta e os indicadores de desempenho para cada uma das avaliações.

7.1.2 Avaliação do ciclo de vida energético

O aspecto ambiental²⁶ da abordagem integrada considerou a metodologia da avaliação do ciclo de vida energético (ACVE). O método de ACVE adotado tomou como base questões relevantes e autores abordados na revisão de literatura assim como as normativas ISO 14040 e 14044. Além dos dados já apresentados na seção 7.1.2 de parâmetros gerais, colocam-se aqui outras questões relevantes da avaliação do ciclo de vida energético e da obtenção dos indicadores considerados.

7.1.2.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo da análise foi a avaliação de um projeto representativo atual da faixa 1 no programa nacional de habitação - Minha Casa, Minha Vida -, com a intenção de comparar benefícios e os impactos com relação à incorporação de medidas de eficiência energética, levando em conta a vida útil da edificação de 50 anos, nas cidades de São Paulo e Salvador, no Brasil. Para isso, foram considerados cenários de mudanças climáticas. Foi comparado em cada cidade o projeto representativo estimado de habitação unifamiliar térrea do Nível de renda 1, considerado caso base, e quatro casos com diferentes medidas de eficiência energética e adaptação às mudanças climáticas incorporadas. Foram excluídos da análise os consumos relacionados à cocção e ao aquecimento de água. O

²⁶ Que inclui o aspecto energético.

público-alvo são os responsáveis pela execução do PMCMV, assim como as companhias de habitação, as construtoras e os projetistas responsáveis pela elaboração dos projetos dentro do Programa. Os resultados do estudo servirão para comparação interna do público-alvo. Foram definidos como indicadores de impacto da avaliação do ciclo de vida energético exclusivamente o consumo energético e as emissões de CO₂.

7.1.2.2 Função, unidade funcional e fluxos de referência

A unidade funcional foi definida como a construção e a ocupação de uma casa de 39,74 m² de área útil durante a sua vida (considerando o período de 50 anos) para atendimento a uma família de quatro pessoas. O fluxo de referência foi dado pelos insumos (materiais, energia e transporte) necessários para garantir a função estimada durante o tempo previsto. Foram incluídos três cenários climáticos para avaliação na fase de uso, sendo atual e de mudanças climáticas, considerando os cenários de 2020 e 2050 conforme metodologia abordada na segunda etapa desta pesquisa. Não foram incluídas na análise funções diferentes às da habitação que pudessem ser posteriores. Igualmente, foram excluídas da avaliação as áreas com funções diferentes das de habitação, como vagas de garagem. Foi analisada a operação da edificação, por meio de simulação termoenergética, tanto com o uso de ventilação natural quanto com o de condicionamento ambiental previsto, o qual foi dimensionado para garantir condições de conforto previamente estabelecidas. Resultados desta avaliação foram também comparados em função de m² de área útil construída.

7.1.2.3 Inventário do ciclo de vida

Descrevem-se aqui premissas do inventário do ciclo de vida que são específicas para a avaliação do ciclo de vida energético.

Para o transporte dos materiais foi adotado o transporte rodoviário como o mais representativo para o Brasil, de acordo com outras pesquisas nacionais. Para o consumo energético do transporte, foi empregado o valor médio de Guimarães et al. (2013), de 0,002044 MJ/kg.km.

A quantidade do material foi determinada em kg. Para isso foi muito importante a densidade de massa aparente adotada do material. Observou-se que o valor da densidade de massa aparente pôde alterar muito os resultados dos materiais. Com relação aos valores de densidade de massa aparente foi observada muita variação nos tijolos e nas telhas de

barro, no concreto, nos isolantes e nas madeiras. Contudo, na maioria das pesquisas publicadas sobre análise de ciclo de vida energético raramente são divulgados os valores adotados. Dados de densidade de massa aparente de materiais foram adotados conforme os valores mostrados nas etapas anteriores desta pesquisa. Esses valores foram baseados na sua grande maioria, na NBR 15220–2. Por ser um projeto hipotético optou-se pelo uso de forma geral de valores estimados como médios entre os limites informados pela norma.

Para os materiais foram buscados dados com relação à energia incorporada e emissões de CO₂. Foram adotados valores nacionais, dando prioridade a: dados mais atuais das pesquisas brasileiras disponíveis, que fossem levantamento de dados primários e ficassem perto da média dos valores elencados. Contudo foram realizadas algumas exceções²⁷. Os dados de materiais levantados em pesquisas nacionais foram colocados no **Apêndice H.2**, sendo identificados por autor. Poucos autores apresentaram dados tanto de energia incorporada quanto de emissões de CO₂ incorporadas para os materiais estudados. Assim, quando possível, foi empregada a fonte do mesmo autor. Para os materiais em que isso não foi possível, foram usados dados de diferentes autores. Entende-se isso como não sendo o procedimento ideal para o levantamento de impacto dos materiais; contudo, optou-se por essa abordagem por privilegiar o uso de dados nacionais. Por outro lado, foram coletados valores internacionais com base em duas fontes: base de dados do ICE Bath (HAMMOND; JONES, 2011); e Gomes e Silva (2015),²⁸ que apresentaram dados do Ecoinvent ajustados à matriz energética brasileira. Os dados internacionais, apresentados no **Apêndice H.3**, foram os únicos que mostraram valores de energia incorporada, CO₂ incorporado e CO₂ equivalente incorporado. Devido aos dados nacionais não apresentarem CO₂ equivalente incorporado, optou-se pelo uso do indicador de CO₂

²⁷ Observou-se que os dados de energia incorporada de materiais estimados por Tavares (2006) têm sido usados em várias pesquisas nacionais; contudo, os dados levantados pelo autor são, na sua maioria, médias de dados nacionais e internacionais. Foram usados desse autor preferencialmente valores correspondentes à pesquisa própria ou, quando usados dados secundários, foram por conta dos mesmos encontrarem-se próximos da faixa dos valores nacionais observados por Garcia (2014). Assim mesmo, alguns dados nacionais de emissões de CO₂ incorporada foram usados de pesquisas que usaram abordagens *top-down* por conta de não terem sido encontrados outros dados disponíveis.

²⁸ Dados da base do ICE Bath e dados fornecidos por Gomes e Silva (2015) são apresentados no Apêndice H.3.

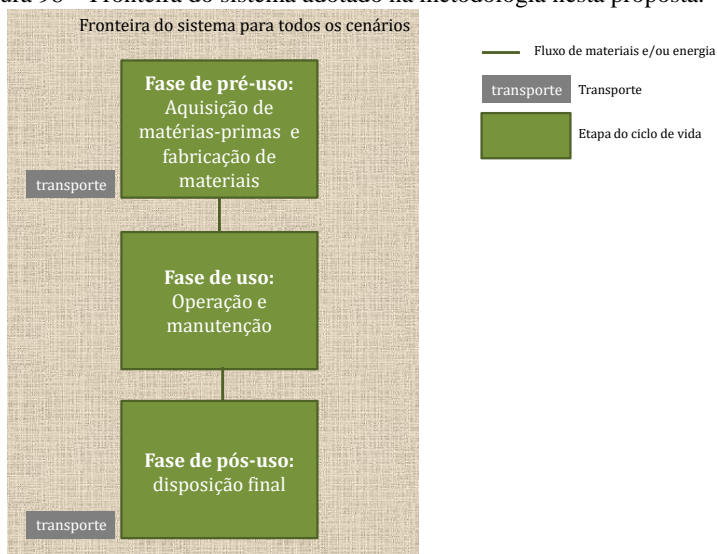
incorporado para esta pesquisa. Os dados internacionais somente foram usados na falta dos dados nacionais. Quando possível, foi verificada a fronteira empregada pelos dados levantados (por exemplo, extração até manufatura do produto), de forma a ser mantida uma coerência entre os dados; entretanto, essa informação não foi sempre possível de se obter. Os valores que compõem a base de dados adotada foram extraídos de pesquisas que forneciam valores únicos. Coloca-se a adoção de um valor único como forma de explicitar a metodologia proposta, onde poderia ser visto o impacto do material específico adotado no projeto. Contudo, reconhece-se como uma limitação o não uso de intervalos de valores para dados de impacto dos materiais. Ao final do **Apêndice H.3** é apresentada uma comparação relacionando os valores encontrados nas diferentes fontes de dados por tipo de material e a justificativa dos dados usados na pesquisa. No Brasil, as bases de dados de materiais com informações relacionadas à energia incorporada e a emissões de CO₂ são escassas e entende-se como uma limitação do trabalho. No entanto, foi adotado o que se encontrou disponível no momento no cenário atual nacional. Considera-se muito relevante o levantamento de dados de materiais com relação à energia incorporada e a emissões de CO₂ e CO₂eq; porém, isso não faz parte do escopo do trabalho.

7.1.2.4 Fronteira do sistema

A análise proposta neste método, limitou-se ao edifício e às suas atividades próprias, sem levar em conta atividades externas, como o transporte dos usuários até o local, o entorno com outras edificações etc., que, embora consideradas questões muito relevantes, não fazem parte do escopo deste estudo. Na fronteira do sistema foram contabilizadas as entradas e as saídas de materiais, energia e transporte nas fases de pré-uso, uso e pós-uso. Na fase de uso foram considerados cenários de mudanças climáticas. A Figura 98 mostra a fronteira do sistema considerada.

Foram estimadas somente as etapas em cada fase que, segundo as pesquisas levantadas na revisão bibliográfica, apresentaram maior influência no ciclo de vida da edificação. Foram adotadas quatro etapas na fase de pré-uso, quatro etapas na fase de uso para manutenção, o uso previsto de condicionamento ambiental e iluminação/equipamentos na fase de uso operacional e a desconstrução do edifício na fase de pós-uso.

Figura 98 – Fronteira do sistema adotado na metodologia nesta proposta.



Com relação ao transporte dos materiais foram verificadas várias abordagens. Alguns autores e *softwares* de ACV consideram além do transporte do material da fábrica até o local da obra, o retorno com o caminhão vazio (Munarim, 2014). Ainda para o transporte do desperdício dos materiais, observou-se na revisão de literatura que outros autores levam em conta na fase de pré-uso duas vezes a distância entre o local da obra até o aterro (TAVARES, 2006), enquanto outros consideram somente o transporte até o local da obra (ADALBERTH, 1997), ou ainda, na etapa de manutenção a distância do fabricante até a obra e da obra ao aterro (ADALBERTH, 1997). Contudo, para manter a mesma fronteira de análise entre todas as avaliações dos indicadores propostos no ciclo de vida, optou-se por incluir na fase de pré-uso somente o transporte dos materiais da fábrica até o local hipotético da obra. Para o transporte do desperdício dos materiais na fase de pré-uso e nas etapas da manutenção, foi incluída a distância transportada do material manufaturado (fábrica) até o local da obra mais a distância do local da obra até o aterro.

Na Tabela 42 exibem-se as etapas previstas para a avaliação do ciclo de vida energético com o nome para identificação. A fase de pré-uso incluiu a energia incorporada inicial; a fase de uso, a energia incorporada recorrente e a energia operacional; e a fase de pós-uso, a energia para desconstrução.

Tabela 42 – Etapas previstas para a avaliação do ciclo de vida energético.

FASE	ETAPA	NOME	
Pré-uso	Energia incorporada (EI) na fabricação dos materiais	$E_{fab\ mat}$	Energia incorporada inicial [EI _i] em MJ
	EI no transporte dos materiais até o local	$E_{tr\ mat}$	
	EI no desperdício dos materiais	$E_{des\ mat}$	
	EI no transporte do desperdício	$E_{tr\ des\ mat}$	
Uso	Consumo estimado para condicionamento ambiental	E_{ca}	Energia operacional [E _{opp}] em MJ
	Consumo outros (eletrodomésticos/iluminação)	$E_{op\ outros}$	
	EI nos materiais para manutenção/reposição	E_{man}	Energia incorporada recorrente [EI _r] em MJ
	EI no transporte dos materiais de manutenção/ reposição	$E_{tr\ man}$	
	EI desperdício dos materiais para manutenção/ reposição	$E_{des\ mat\ man}$	
	EI transporte do desperdício dos materiais de manutenção/ reposição	$E_{tr\ des\ mat\ man}$	
Pós-uso	Energia para desconstrução do edifício	E_d	Energia para desconstrução [E _d] em MJ

A seguir é apresentada por fase do ciclo de vida, a forma de cálculo para cada uma das etapas previstas.

a) Fase Pré-uso

A fase de pré-uso considerada como a energia incorporada inicial incluiu a aquisição de matérias-primas com as entradas e as saídas no seu processo de manufatura, além do transporte do material até o local da obra e o desperdício dos materiais. A energia consumida para a construção do edifício no local da obra por parte dos equipamentos, assim como o transporte dos trabalhadores que podem ser incluídos nessa etapa não foram considerados. Também não foi levada em conta a energia gasta na limpeza e na preparação do terreno. Da obra em si, somente foi contabilizado o desperdício dos materiais na construção. Assim, a fase de pré-uso foi calculada como a energia incorporada inicial, conforme a Equação 6a:

Energia incorporada inicial

$$EI_i = E_{\text{fab mat}} + E_{\text{tr mat}} + E_{\text{des mat}} + E_{\text{tr des mat}} \quad \text{Equação 6a}$$

Onde:

EI_i = Energia incorporada inicial do edifício em MJ;

$E_{\text{fab mat}}$ = Energia incorporada na fabricação dos materiais em MJ igual à $(\sum m_i \cdot CE_i)$;

$E_{\text{tr mat}}$ = Transporte dos materiais até o local da obra em MJ igual à $(\sum m_i \cdot d_i \cdot CE_{\text{tr}})$;

$E_{\text{des mat}}$ = Desperdício dos materiais em MJ igual à $(\sum m_i \cdot fd_i \cdot CE_i)$;

$E_{\text{tr des mat}}$ = Transporte dos materiais desperdiçados em MJ igual à $(\sum m_i \cdot fd_i \cdot CE_{\text{tr}} \cdot (d_i + d_a))$.

Desta forma, a Equação 6a pode ser calculada de forma equivalente conforme a Equação 6b.

$$EI_i = \sum m_i \cdot CE_i + \sum m_i \cdot d_i \cdot CE_{\text{tr}} + \sum m_i \cdot fd_i \cdot CE_i + \sum m_i \cdot fd_i \cdot CE_{\text{tr}} \cdot (d_i + d_a) \quad \text{Equação 6b}$$

Onde:

EI_i = Energia incorporada inicial do edifício em MJ;

m_i = Quantidade do material (i) de construção do edifício em kg;

CE_i = Conteúdo energético (energia incorporada) do material (i) por quantidade unitária em MJ/kg;

d_i = Distância do fabricante do material (i) até o local da obra em km;

CE_{tr} = Consumo energético do transporte utilizado em MJ/kg.km;

fd_i = Fator de desperdício do material (i) em número decimal; e

d_a = Distância do local da obra ao depósito de material desperdiçado em km.
Nesta proposta considerado aterro.

b) Fase uso

Nesta fase foram contabilizadas as entradas e as saídas referentes à operação da edificação por parte do usuário, ao longo da vida útil, relacionadas, por um lado, com o fluxo de materiais e energia devido à manutenção e à reposição de materiais da edificação, conhecida como **energia incorporada recorrente ou de manutenção**, e, por outro, com o tipo de energia usada na operação da edificação, considerada a **energia operacional**. Dessa forma, a fase de uso foi calculada como a soma da energia incorporada recorrente ou de manutenção mais a energia de operação, conforme Equação 7.

$$\text{Fase de uso} = E_{\text{opp}} + EI_r \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

E_{opp} = Energia primária total na vida útil do edifício em MJ; e
 E_{I_r} = Energia incorporada recorrente ou de manutenção total em MJ.

A metodologia usada na obtenção de cada um dos parâmetros da fase de uso é apresentada a seguir.

Fase de uso – Energia incorporada recorrente ou de manutenção

Foram considerados os insumos necessários à manutenção da edificação. A energia incorporada recorrente foi estimada conforme a Equação 8a:

$$E_{I_r} = E_{man} + E_{tr\ man} + E_{des\ mat\ man} + E_{tr\ des\ mat\ man} \quad \text{Equação 8a}$$

Onde:

- E_{I_r} = Energia incorporada recorrente do edifício em MJ;
- E_{man} = Energia incorporada nos materiais de manutenção/reposição em MJ igual à $(E_{fab\ mat} \cdot F_r + E_{fab\ mat} \cdot F_r)$;
- $E_{tr\ man}$ = Transporte dos materiais de manutenção/reposição em MJ igual à $(E_{tr\ mat} \cdot F_r)$;
- $E_{des\ mat\ man}$ = Energia incorporada no desperdício dos materiais para manutenção/reposição igual à $(E_{des\ mat} \cdot F_r)$;
- $E_{tr\ des\ mat\ man}$ = Energia incorporada no transporte do desperdício dos materiais de manutenção/ reposição igual à $(E_{tr\ des\ mat} \cdot F_r)$;

Assim, a Equação 8a pode ser calculada analogamente conforme a Equação 8b.

$$E_{I_r} = E_{fab\ mat} \cdot F_r + E_{tr\ mat} \cdot F_r + E_{des\ mat} \cdot F_r + E_{tr\ des\ mat} \cdot F_r \quad \text{Equação 8b}$$

Onde:

- E_{I_r} = Energia incorporada recorrente do edifício em MJ;
- $E_{fab\ mat}$ = Energia incorporada na fabricação dos materiais em MJ conforme a Equação 6a;
- $E_{tr\ mat}$ = Transporte dos materiais até o local da obra em MJ conforme Eq. 6a;
- $E_{des\ mat}$ = Desperdício dos materiais em MJ conforme a Equação 6a;
- $E_{tr\ des\ mat}$ = Transporte dos materiais desperdiçados em MJ conforme a Eq. 6a;
- F_r = Fator de reposição/número de renovações do material (i) igual a $[(V_{ed}/V_{mi}) - 1]$;
- V_{ed} = Vida útil do edifício em anos; e
- V_{mi} = Vida útil do material (i) em anos. Nesta proposta foi considerada a vida útil do componente (por exemplo, paredes internas), assumindo-se que os materiais

(por exemplo, tijolo) usados nos componentes devem garantir essa vida útil, conforme determinado pela NBR 15575.

Energia operacional – fase de uso

A energia operacional considerou os consumos referentes ao uso de equipamentos, iluminação e condicionamento ambiental previsto para refrigeração e aquecimento,²⁹ por meio de simulação termoenergética, com avaliação em relação às mudanças climáticas, conforme metodologia abordada na segunda etapa desta pesquisa. Dessa forma, os dados usados para a energia operacional nesta fase foram os dados resultantes dos indicadores de consumo energético previsto anual para os três cenários climáticos analisados, obtidos na segunda etapa, para o caso base e os 4 casos escolhidos para avaliação por cidade.

Os dados com relação ao consumo operacional, inicialmente anuais expressos em kWh/ano foram transformados em MJ e, finalmente em energia primária. Para a conversão de eletricidade em energia primária, foi adotado o valor do PNE 2030 de 1,49. Salienta-se que, embora tenha sido observado o uso de fatores maiores por outros autores, e ainda mais, a previsão de fatores maiores no futuro por autores como Santos (2011), optou-se por manter o valor previsto pelo PNE como forma de conservar a coerência com o uso de outros valores previstos nesse documento e por ser considerado um documento oficial. O mesmo fator foi aplicado a todos os cenários climáticos, tanto atual quanto os futuros, como forma de serem realizadas comparações diretas entre cenários. Igualmente, foi privilegiado o uso de um valor futuro diante de valores atuais, por acreditar-se mais apropriado para comparações entre os três cenários. Por outro lado, para conversão de MJ em kWh, foi empregado 1 MJ sendo igual a 0,277778 kWh. A energia operacional primária na vida útil foi então resultante da soma da energia consumida durante a vida útil da edificação para condicionamento ambiental e do uso de equipamentos e iluminação expresso conforme a Equação 9.

$$E_{opp} = ((E_{ca} + E_{op \text{ outros}}) / 0,277777778) * V_{ed} * F_c \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

E_{opp} = Consumo de energia primária de operação da edificação na vida útil em MJ;

E_{ca} = Consumo anual para condicionamento ambiental em kWh;

²⁹ Somente para São Paulo.

$E_{op\ outros}$ = Consumo anual de eletrodomésticos e iluminação em kWh;
 F_c = Fator de conversão de eletricidade em energia primária, considerado em 1,49; e
 V_{ed} = Vida útil do edifício em anos.

O consumo de energia primária na operação da edificação na vida útil foi estimado para os três cenários climáticos avaliados: atual ($E_{opp\ atual}$), 2020 ($E_{opp\ 2020}$) e 2050 ($E_{opp\ 2050}$).

c) Fase pós-uso

Nesta fase, faz-se uso da energia para desconstrução. Para o seu cálculo deve ser estimado o fluxo de materiais, energia e transporte em função da disposição final da edificação, a qual nesta proposta foi considerada como aterro. Por questões de delimitação da fronteira, não foi estimado o cenário de reciclagem. Considera-se que, embora a reciclagem possa diminuir, em grande parte, a energia incorporada inicial, não foi avaliada em função de duas razões: a primeira, em virtude do foco ser a avaliação das medidas de eficiência energética incorporadas ao projeto inicial; e a segunda, pela carência atual de dados em relação às possibilidades de reciclagem de materiais, energia, emissões e custo incorporado no processo. Com base em estudos nacionais elencados na revisão de literatura a fase de pós-uso foi estimada para esta avaliação considerando-se 10% da energia incorporada inicial total. Reconhece-se isso como sendo uma simplificação; entretanto, encontra-se apoiado nos resultados observados para a mesma tipologia em pesquisas nacionais. Dá-se, portanto, um aprofundamento maior nesta pesquisa nas primeiras fases do ciclo de vida da edificação, visto que, como colocado inicialmente, a fase de pós-uso é a que no estado da arte atual apresenta maior incerteza entre as fases do ciclo de vida. Portanto, essa fase foi considerada conforme a Equação 10.

$$E_d = EI_i \cdot (0,1) \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

E_d = Energia para desconstrução do edifício em MJ; e

EI_i = Energia incorporada inicial do edifício em MJ.

7.1.2.4.1 Consumo energético no ciclo de vida da edificação

A energia total no ciclo de vida energético da edificação, foi calculada conforme a Equação 11:

$$E_{CVE} = (EI_i + E_{opp} + EI_r + E_d) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

E_{CVE} = Energia total no ciclo de vida energético da edificação em MJ;

EI_i = Energia incorporada inicial em MJ;

E_{opp} = Energia operacional em MJ;

EI_r = Energia incorporada recorrente em MJ;

E_d = Energia para desconstrução em MJ,

Ainda pode ser ajustada, quando necessário para algumas comparações considerando a área útil da edificação na Equação 12.

$$E_{CVE} = (EI_i + E_{opp} + EI_r + E_d) / A_{ed} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

E_{CVE} = Energia total no ciclo de vida energético da edificação em MJ/m²;

EI_i = Energia incorporada inicial em MJ;

E_{opp} = Energia operacional em MJ;

EI_r = Energia incorporada recorrente em MJ;

E_d = Energia para desconstrução em MJ,

A_{ed} = Área útil da edificação em m².

A energia total no ciclo de vida energético da edificação (E_{CVE}), resultado da avaliação do ciclo de vida energético, e expressa em MJ ou MJ/m² foi calculada para cada um dos cenários climáticos analisados: atual ($E_{CVE \text{ atual}}$), cenário de 2020 ($E_{CVE \text{ 2020}}$) e cenário de 2050 ($E_{CVE \text{ 2050}}$). A E_{CVE} é um dos indicadores da avaliação do ciclo de vida energético. Os resultados para esse indicador são exibidos por fase e consideram a energia incorporada (inicial e recorrente) e a energia operacional. Igualmente e similar a pesquisas levantadas na revisão de literatura, a energia incorporada é mostrada tanto por serviço ou componente na edificação quanto por material.

7.1.2.4.2 Emissões de CO₂ no ciclo de vida

Adotou-se também as emissões de CO₂ como indicador para a avaliação de impacto no ciclo de vida energético³⁰. Considerando-se a mesma

³⁰As emissões de CO₂ estão relacionadas à categoria de impacto de mudanças climáticas. As mesmas são expressas em kgCO₂. Entretanto, outras categorias relacionam o impacto no aquecimento global expresso em kgCO₂eq, pois consideram não somente o impacto das emissões de CO₂, mas também dos outros gases de efeito estufa. Contudo, a revisão de literatura mostrou a maioria

fronteira de análise já apresentada, a Tabela 43 mostra as fases e etapas adotadas na avaliação.

Tabela 43 – Etapas por fase consideradas para o cálculo do indicador de emissões de CO₂ no ciclo de vida.

FASE	ETAPA	NOME	
Pré- uso	Emissões na fabricação dos materiais	Em _{mat}	Emissões incorporadas iniciais [Em _i] em kgCO ₂
	Emissões no transporte dos materiais até o local	Em _{tr mat}	
	Emissões dos materiais de desperdício	Em _{des mat}	
	Emissões no transporte dos materiais de desperdício	Em _{tr des mat}	
Uso	Emissões para condicionamento ambiental	Em _{ca}	Emissões da operação total [Em _{op}] em kgCO ₂
	Emissões outros (eletrodomésticos/iluminação)	Em _{op outros}	
	Emissões dos materiais para manutenção/reposição	Em _{man}	Emissões incorporadas recorrentes [Em _r] em kgCO ₂
	Emissões no transporte dos materiais de manutenção/reposição	Em _{tr man}	
	Emissões dos materiais de desperdício para manutenção/reposição	Em _{des mat man}	
	Emissões no transporte dos materiais de desperdício para manutenção/ reposição	Em _{tr des mat man}	
Pós- uso	Emissões referentes à desconstrução do edifício	Em _d	Emissões totais da desconstrução [Em _d] em kgCO ₂

dos dados brasileiros disponíveis sobre emissão no processo de fabricação e transporte dos materiais, relacionados a emissões de CO₂. No entanto, as referências internacionais mostraram como o indicador mais usado kgCO₂eq. Desta forma, reconhece-se a importância global do indicador de CO₂ equivalente, entretanto por questão da disponibilidade de dados adotou-se as emissões de CO₂ como indicador para a avaliação de impacto no ciclo de vida energético. Consideram-se outras categorias de impacto ambiental também muito importantes, porém adotou-se a realização de uma ACVE e portanto, se optou pelo indicador considerado desde a perspectiva ambiental e ligado às mudanças climáticas um dos mais representativos para a edificação.

A forma de cálculo de cada etapa nas três fases é detalhada a seguir.

a) Fase pré-uso

A fase de pré-uso foi calculada levando em conta as emissões da energia incorporada inicial, conforme a Equação 13a.

$$Em_i = Em_{fab\ mat} + Em_{tr\ mat} + Em_{des\ mat} + Em_{tr\ des\ mat} \quad \text{Equação 13a}$$

Onde:

Em_i = Emissões referentes à energia incorporada inicial do edifício em $kgCO_2$;

$Em_{fab\ mat}$ = Emissões referentes à fabricação dos materiais em $kgCO_2$ sendo igual à $(\sum m_i \cdot CEM_i)$;

$Em_{tr\ mat}$ = Emissões referentes ao transporte dos materiais até o local da obra em $kgCO_2$ igual à $(\sum m_i \cdot d_i \cdot CEM_{tr})$;

$Em_{des\ mat}$ = Emissões referentes ao desperdício dos materiais em $kgCO_2$ igual à $(\sum m_i \cdot fd_i \cdot CEM_i)$;

$Em_{tr\ des\ mat}$ = Emissões referentes ao transporte dos materiais desperdiçados em $kgCO_2$ igual à $(\sum m_i \cdot fd_i \cdot CEM_{tr} \cdot (d_i + d_a))_2$;

Contudo, a Equação 13a pode ser expressada conforme a Equação 13b.

$$Em_i = \sum m_i \cdot CEM_i + \sum m_i \cdot d_i \cdot CEM_{tr} + \sum m_i \cdot fd_i \cdot CEM_i + \sum m_i \cdot fd_i \cdot CEM_{tr} \cdot (d_i + d_a) \quad \text{Equação 13b}$$

Onde:

Em_i = Emissões referentes à energia incorporada inicial do edifício em $kgCO_2$;

m_i = Quantidade do material (i) de construção do edifício em kg;

CEM_i = Emissões (incorporadas) do material (i) por quantidade unitária em $kgCO_2/kg$;

d_i = Distância do fabricante do material (i) até o local da obra em km;

CEM_{tr} = Emissões referentes ao transporte utilizado em $kgCO_2/kg \cdot km$;

fd_i = Fator de desperdício do material (i) em decimal; e

d_a = Distância do local da obra ao depósito de material desperdiçado em km.

Nesta proposta foi considerado o aterro.

Dados com relação às emissões na fabricação dos materiais encontram-se, conforme indicado anteriormente, nos **Apêndices H.2** (pesquisas nacionais) e **H.3** (dados internacionais). Para as emissões com relação ao transporte rodoviário foi adotada a estimativa do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) de 2013 adotada por Junior et al. (2015) por ser uma referência mais recente. Dessa forma, para a emissão por transporte rodoviário, foi considerado o fator de 0,00011917 $kgCO_2/kg \cdot km$.

b) Fase uso

A fase de uso foi calculada em função das emissões na etapa de operação e na etapa de manutenção conforme a Equação 14.

$$\text{Fase de uso} = \text{Em}_{\text{op}} + \text{Em}_{\text{r}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

Em_{op} = Emissões referentes à energia operacional total do edifício em kgCO_2 ; e
 Em_{r} = Emissões referentes à energia incorporada recorrente na manutenção em kgCO_2 .

Para as emissões na etapa de manutenção, considerou-se a Equação 15a:

$$\text{Em}_{\text{r}} = \text{Em}_{\text{man}} + \text{Em}_{\text{tr man}} + \text{Em}_{\text{des mat man}} + \text{Em}_{\text{tr des mat man}} \quad \text{Equação 15a}$$

Onde:

Em_{r} = Emissões referentes à manutenção do edifício em kgCO_2 ;
 Em_{man} = Emissões referentes aos materiais de manutenção/reposição em kgCO_2 igual à $(\sum \text{Em}_{\text{fab mat}} \cdot \text{Fr})$;
 $\text{Em}_{\text{tr man}}$ = Emissões referentes ao transporte dos materiais de manutenção/reposição em kgCO_2 igual à $(\sum \text{Em}_{\text{tr mat}} \cdot \text{Fr})$;
 $\text{Em}_{\text{des mat man}}$ = Emissões referentes ao desperdício dos materiais para manutenção/reposição em kgCO_2 igual à $(\text{Em}_{\text{des mat}} \cdot \text{Fr})$;
 $\text{Em}_{\text{tr des mat man}}$ = Emissões referentes ao transporte do desperdício dos materiais de manutenção/reposição em kgCO_2 igual à $(\text{Em}_{\text{tr des mat}} \cdot \text{Fr})$;

Assim, a Equação 15a pode ser calculada de forma equivalente conforme a Equação 15b, como segue.

$$\text{Em}_{\text{r}} = \sum \text{Em}_{\text{fab mat}} \cdot \text{Fr} + \sum \text{Em}_{\text{tr mat}} \cdot \text{Fr} + \text{Em}_{\text{des mat}} \cdot \text{Fr} + \text{Em}_{\text{tr des mat}} \cdot \text{Fr} \quad \text{Equação 15b}$$

Onde:

Em_{r} = Emissões referentes à manutenção do edifício em kgCO_2 ;
 $\text{Em}_{\text{fab mat}}$ = Emissões referentes à fabricação dos materiais em kgCO_2 conforme as Equações 13a e 13b;
 $\text{Em}_{\text{tr mat}}$ = Emissões referentes ao transporte dos materiais até o local da obra em kgCO_2 conforme Equações 13a e 13b;
 $\text{Em}_{\text{des mat}}$ = Emissões referentes ao desperdício dos materiais em kgCO_2 conforme Equações 13a e 13b;
 $\text{Em}_{\text{tr des mat}}$ = Emissões referentes ao transporte dos materiais desperdiçados em kgCO_2 conforme Equações 13a e 13b;

F_r = Fator de reposição do material (i) igual a $[(V_{ed}/V_{mi})-1]$;
 V_{ed} = Vida útil do edifício; e
 V_{mi} = Vida útil do material (i) ou VUP.

As emissões na etapa de operação da edificação na fase de uso foram calculadas conforme a Equação 16.

$$Em_{opp} = ((E_{ca}/0,277778).F_c) + ((E_{op\ outros}/0,277778).F_c).V_{ed}.F_{em}$$

Equação 16

Onde:

Em_{opp} = Emissões referentes à energia operacional total em $kgCO_2$;
 E_{ca} = Consumo anual para condicionamento ambiental em kWh;
 $E_{op\ outros}$ = Consumo anual de eletrodomésticos e iluminação em kWh;
 F_c = Fator de conversão de eletricidade em energia primária;
 F_{em} = Fator de emissão de carbono em $kgCO_2/MJ$; e
 V_{ed} = Vida útil do edifício em anos.

Conforme indicado na segunda etapa desta pesquisa, o fator de emissão de carbono considerado foi de $0,156\ kgCO_2/kWh$ com base no PNE 2030. Portanto, para o fator de emissão para energia primária, adotou-se $0,043\ kgCO_2/MJ$. As emissões relativas ao consumo de energia de operação da edificação na vida útil foram estimadas para os três cenários climáticos: atual ($Em_{opp\ atual}$), 2020 ($Em_{opp\ 2020}$) e 2050 ($Em_{opp\ 2050}$) conforme a metodologia já detalhada na Etapa 2.

c) Fase pós-uso

Esta fase também foi calculada de forma simplificada considerando-se 10% das emissões da fase de pré-uso, novamente apoiado em resultados observados em pesquisas nacionais da mesma tipologia. Assim, a fase de pós-uso foi calculada conforme a Equação 17:

$$Em_d = Em_i \cdot (0,1) \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

Em_d = Emissões totais da energia para desconstrução do edifício em $kgCO_2$; e
 Em_i = Emissões da energia incorporada inicial do edifício em $kgCO_2$.

As emissões totais no ciclo de vida energético da edificação foram, portanto, calculadas segundo a Equação 18:

$$Em_{CVE} = (Em_i + Em_{opp} + Em_r + Em_d) \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

Em_{CVE} = Emissões totais no ciclo de vida energético da edificação em $kgCO_2$;

Em_i = Emissões da energia incorporada inicial em $kgCO_2$;

Em_{op} = Emissões da energia operacional total em $kgCO_2$;

Em_r = Emissões da energia incorporada recorrente em $kgCO_2$;

Em_d = Emissões da energia para desconstrução em $kgCO_2$.

A equação ainda foi ajustada considerando a área da edificação, conforme a Equação 19 para realizar algumas comparações com resultados de outras pesquisas.

$$Em_{CVE} = (Em_i + Em_{op} + Em_r + Em_d) / A_{ed} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

Em_{CVE} = Emissões totais no ciclo de vida energético da edificação em $kgCO_2/m^2$;

Em_i = Emissões da energia incorporada inicial em $kgCO_2$;

Em_{op} = Emissões da energia operacional total em $kgCO_2$;

Em_r = Emissões da energia incorporada recorrente em $kgCO_2$;

Em_d = Emissões da energia para desconstrução em $kgCO_2$; e

A_{ed} = Área da edificação em m^2 .

7.1.3 Avaliação de custos no ciclo de vida

O aspecto econômico da abordagem integrada considerou a metodologia de avaliação de custo no ciclo de vida (CCV), sendo o indicador de desempenho o custo total no ciclo de vida da edificação. As seguintes etapas foram propostas nesta avaliação (Tabela 44) as quais seguem a mesma fronteira do sistema da avaliação do ciclo de vida energético.

Tabela 44 – Fases e etapas da avaliação econômica.

FASE	ETAPA	NOME	
Pré-uso	Custo inicial dos materiais da obra	C_{mat}	Custo do investimento inicial [C_i]
	Custo do transporte dos materiais até o local	$C_{tr\ mat}$	
	Custo dos materiais de desperdício	$C_{des\ mat}$	
	Custo do transporte do desperdício	$C_{tr\ des\ mat}$	
Uso	Custo do consumo previsto para condicionamento ambiental	C_{ca}	Custo da energia operacional [C_{opp}]
	Custo do consumo de energia outros (eletrodomésticos/iluminação)	$C_{op\ outros}$	
	Custo dos materiais para manutenção/reposição	C_{man}	Custo da manutenção [C_m]
	Custo do transporte dos materiais de manutenção/reposição	$C_{tr\ man}$	
	Custo do desperdício dos materiais para manutenção/reposição	$C_{des\ mat\ man}$	
	Custo no transporte do desperdício dos materiais de manutenção/reposição	$C_{tr\ des\ mat\ man}$	
Pós-uso	Custo da desconstrução do edifício (demolição + transporte dos materiais de demolição)	C_d	Custo da desconstrução [C_d]

Cada fase e suas respectivas etapas são detalhadas a seguir.

7.1.3.1 Fase pré-uso

A fase de pré-uso constitui o custo do investimento inicial. Para este estágio, foram levantados a quantidade e o custo inicial dos materiais e dos componentes usados no caso base e nas alternativas propostas, considerando-se somente os materiais dos componentes que estão sendo analisados. Os custos iniciais dos materiais foram obtidos na base do SINAPI para os estados de São Paulo e Bahia, adotando-se o preço mediano do mês de março de 2016. O **Apêndice H.4** mostra os custos dos materiais e dos componentes para o caso base e os quatro casos com medidas de adaptação para ambas as cidades. Os preços são exibidos por identificação da medida, descrição, composição dos materiais, código conforme o SINAPI, custo do material por estado e unidade do preço. Para custos de materiais não encontrados na base do SINAPI, foram adotadas duas estratégias. Como primeira opção, custos de materiais

determinados como equivalentes ou aproximados, os quais foram encontrados na mesma base; e como segunda opção, pesquisa com fornecedores. Em ambas as opções, foi identificada a origem dos dados. Para a quantidade dos materiais associados ao custo inicial, foi observada a unidade para os custos disponibilizada no SINAPI e adaptada conforme necessário. Os custos do transporte foram levantados com base na Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística³¹ também para março de 2016. A Associação fornece valores para transporte de carga corrigidos mensalmente pela inflação, podendo ser obtidos valores para carga fracionada ou lotação. Foi considerado como parâmetro o custo do transporte de carga lotação. Os valores são dados em função da distância conforme a Tabela 45.

Tabela 45 – Índice Nacional de Custos do Transporte – Carga lotação (referência março 2016).

Percurso	Distância (km)	R\$/ton
Muito curto	50	68,71
Curto	400	126,98
Médio	800	196,22
Longo	2.400	457,75
Muito Longo	6.000	1.034,59

Fonte: NTC (2016).

Dessa forma, o custo do investimento inicial total foi calculado conforme a Equação 20a.

$$C_i = C_{\text{mat}} + C_{\text{tr mat}} + C_{\text{des mat}} + C_{\text{tr des mat}} \quad \text{Equação 20a}$$

Onde:

C_i = Custo do investimento inicial total em R\$;

C_{mat} = Preço final do insumo no ano 0 em R\$ igual à $(\sum m_{iS}.C_{i \text{ mat}})$;

$C_{\text{tr mat}}$ = Custo do transporte dos materiais até o local no ano 0 em R\$ igual à $(\sum m_i.C_{\text{tr mat}0})$;

$C_{\text{des mat}}$ = Custo inicial do desperdício dos materiais em R\$ igual à $(\sum C_{\text{mat}}.fd_i)$;

$C_{\text{tr des mat}}$ = Custo inicial do transporte do desperdício dos materiais em R\$ igual à $((\sum m_i.f d_i.C_{\text{trmat}0})+(\sum m_i.f d_i.C_{\text{trmatAt}}))$;

³¹ Segundo Araújo, Bandeira e Campos (2014), estes valores são adotados como referência pela maioria das empresas e cooperativas de transporte de carga no país.

Por tanto, a Equação 20a pode ser calculada com expressões equivalentes conforme a Equação 20b.

$$C_i = \sum m_{iS} \cdot C_{i \text{ mat}} + \sum m_i \cdot C_{\text{tr mat}0} + \sum C_{\text{mat}} \cdot fd_i + ((\sum m_i \cdot fd_i \cdot C_{\text{tr mat}0}) + (\sum m_i \cdot fd_i \cdot C_{\text{tr matAt}})) \quad \text{Equação 20b}$$

Onde:

C_i = Custo do investimento inicial total em R\$;

m_{iS} = Quantidade do material (i) de construção do edifício na unidade do custo do SINAPI;

$C_{i \text{ mat}}$ = Custo inicial do material no ano 0 em R\$/unidade SINAPI;

m_i = Quantidade do material (i) de construção do edifício em kg;

$C_{\text{tr mat}0}$ = Custo do transporte do material inicial em R\$/kg conforme NTC em função da distância (da manufatura à obra);

$C_{\text{tr matAt}}$ = Custo do transporte do material ao aterro em R\$/kg conforme NTC em função da distância (da obra ao aterro); e

fd_i = Fator de desperdício do material (i) em decimal.

7.1.3.2 Fase uso

Na fase de uso, foi considerado tanto o custo do uso da energia para operação da edificação quanto o custo de reposição/manutenção dos materiais, analisando o período de 50 anos. Para a etapa de manutenção, foram levados em conta os custos com base no valor presente líquido (VPL). Para o cálculo do VPL, os valores de custo inicial dos materiais foram transformados inicialmente em valor futuro, colocando a inflação e depois descontados a valor presente, empregando a taxa de desconto com base na metodologia abordada por Islam et al. (2015). Dessa forma, o valor futuro foi calculado por meio da Equação 21. Para o valor presente líquido ou descontado, foi usada a Equação 22.

$$CF = VP \cdot (1+f)^n \quad \text{Equação 21}$$

$$VPL = CF / (1+d)^n \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

CF = Custo futuro em R\$;

VPL = Valor presente descontado em R\$;

VP = Valor presente (inicial) em R\$;

f = Taxa de inflação em decimal;

d = Taxa de desconto em decimal; e

n = Número de anos.

Para a taxa de inflação foi usada a média dos últimos 10 anos, com base no Índice Nacional de Custos da Construção (INCC–DI). O INCC do IBGE mostra a produção de custos e índices da construção civil, considerando os preços de materiais e salários que são pagos na construção civil, no setor de habitação, sendo produzido em convênio com a Caixa. Por outro lado, foi adotada a taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) como a taxa de desconto com base em Santos (2007). Os meses de dezembro representam o acumulado no ano. Ambas as informações encontram-se disponíveis no Portal Brasil (2016). A Tabela 46 mostra o histórico dos últimos 10 anos para as referências mencionadas. O valor adotado para a taxa de inflação foi de 0,0709 e para a taxa de desconto de 0,1197.

Tabela 46 – Índice Nacional de Custos da Construção e taxa SELIC nos últimos 10 anos.

Índice acumulado nos últimos 12 meses		
Ano	INCC – DI (Índice Nacional de Custos da Construção) Usada como taxa de Inflação (%)	Taxa SELIC Usada como taxa de desconto (%)
Dez 2015	7,49	13,47
Dez 2014	6,94	10,96
Dez 2013	8,09	8,29
Dez 2012	7,12	8,62
Dez 2011	7,48	11,76
Dez 2010	7,77	9,90
Dez 2009	3,25	10,13
Dez 2008	11,86	12,45
Dez 2007	6,16	12,04
Dez 2006	5,04	14,91
Dez 2005	6,83	19,13
Média	7,09	11,96

Na avaliação econômica não foi considerado o valor residual dos materiais por conta de não estar sendo considerado o cenário de reciclagem. O custo da energia operacional foi dado em função dos valores obtidos na simulação termoenergética da Etapa 2 desta pesquisa. Para a composição do valor final do custo da energia operacional, foram observados valores das concessionárias e o preço médio do kWh por

cidade para a tarifa residencial³². Também foram acrescentados os valores de tributos federais do Programa de Integração Social (PIS) e da Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), assim como os tributos estaduais do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS)³³. O valor de PIS/COFINS tem variação mensal, que pode chegar a 9%, já o ICMS é um valor fixo em torno de 25%. As tarifas residenciais médias são informadas pela ANEEL e têm variação por estado e distribuidora. Para o estado de São Paulo, em março de 2016 as tarifas residenciais médias variavam de 0,30R\$/kWh a 0,60R\$/kWh. O estado da Bahia, por outro lado, é atendido somente por uma distribuidora. Assim sendo, para os casos avaliados na cidade de São Paulo, foi considerada a tarifa média residencial de 0,44 R\$/kWh, o valor do ICMS de 25% e o PIS/COFINS de 7,21%.³⁴ Portanto, o preço final da energia para São Paulo foi considerado em 0,58 R\$/kWh. Para Salvador, foi adotado o valor da tarifa de 0,39 R\$/kWh, o valor do ICMS de 27% e o do PIS/COFINS de 4,01%.³⁵ Dessa forma, o valor final do preço de energia determinado para Salvador foi de 0,51 R\$ por kWh. Os valores foram ajustados usando a metodologia de valor presente líquido, ou seja, considerando a inflação. Os resultados foram mostrados para os três cenários climáticos. O cálculo desta fase foi dado pela Equação 23, 24 e 25.

$$\text{Fase de uso} = C_{opp} + C_m \quad \text{Equação 23}$$

Onde :

C_{opp} = Custo da energia operacional total em VPL na vida útil em R\$;

C_m = Custo da manutenção total na vida útil em VPL em R\$;

Sendo,

$$C_{opp} = \sum VPL ((E_{op \text{ outros}} + E_{ca}) \cdot T_{res}) \quad \text{Equação 24}$$

Onde :

C_{opp} = Custo da energia operacional total em VPL na vida útil em R\$;

³² Para simplificação não foram considerados valores diferentes por faixas de consumo.

³³ Os impostos relacionados ao PIS/COFINS e ao ICMS foram incluídos no preço da tarifa, com base em Montenegro (2013).

³⁴ Valores de PIS/COFINS da distribuidora CPFL para São Paulo em março de 2016, sendo PIS de 1,29% e COFINS de 5,92% da CPFL.

³⁵ Valores com base na concessionária Coelba de março de 2016.

$E_{op\ outros}$ = Consumo de energia anual para equipamentos e iluminação em kWh;
 E_{ca} = Consumo de energia anual para condicionamento ambiental em kWh; e
 T_{res} = Preço em R\$ do kWh por estado para a tarifa residencial.
 Todos os valores são convertidos a valor presente líquido.

E ainda,

$$C_m = C_{man} + C_{tr\ man} + C_{des\ mat\ man} + C_{tr\ des\ mat} \quad \text{Equação 25a}$$

Onde:

C_m = Custo da manutenção total na vida útil em VPL em R\$;
 C_{man} = Custo dos materiais para manutenção/reposição em VPL em R\$ igual à $(\Sigma VPL_i - \Sigma VPL_{Ri})$;
 $C_{tr\ man}$ = Custo do transporte dos materiais de manutenção/reposição em VPL em R\$ igual à $(\Sigma VPL_{tr\ i})$;
 $C_{des\ mat\ man}$ = Custo do desperdício dos materiais para manutenção/reposição em VPL em R\$ igual à $(C_{man} \cdot fd_i)$;
 $C_{tr\ des\ mat}$ = Custo no transporte do desperdício dos materiais de manutenção/reposição em VPL em R\$ igual à $(\Sigma VPL_{tr\ i} \cdot fd_i + \Sigma VPL_{tr\ i\ da} \cdot fd_i)$;

Assim, a Equação 25a é equivalente às expressões na equação 25b.

$$C_m = (\Sigma VPL_i - \Sigma VPL_{Ri}) + \Sigma VPL_{tr\ i} + C_{man} \cdot fd_i + (\Sigma VPL_{tr\ i} \cdot fd_i + \Sigma VPL_{tr\ i\ da} \cdot fd_i) \quad \text{Equação 25b}$$

Onde:

C_m = Custo da manutenção total na vida útil em VPL em R\$;
 VPL_i = Valor presente líquido/valor presente descontado da manutenção na vida útil do material i . Considera todas as manutenções necessárias (R\$);
 VPL_{Ri} = Valor presente líquido do valor residual na vida útil. Considera o valor final do insumo na vida útil, ou seja 50 anos (R\$);
 $VPL_{tr\ i}$ = Valor presente líquido do transporte do material de manutenção considerando a distância do local de manufatura até a obra. Considera todas as manutenções necessárias na vida útil (R\$); e
 $\Sigma VPL_{tr\ i\ da}$ = Valor presente líquido do transporte do material de manutenção considerando a distância da obra ao aterro. Considera todas as manutenções necessárias na vida útil (R\$); e
 fd_i = Fator de desperdício do material (i) em decimal.

7.1.3.3 Fase pós-uso

Para a fase de pós-uso, foi realizada uma abordagem diferente das avaliações anteriores, por causa da disponibilidade de dados, porém

mantendo a mesma fronteira de análise da avaliação do ciclo de vida energético. Para tanto, foram considerados a quantidade dos materiais; e o preço para demolição (preferencialmente) ou a retirada dos materiais ou componentes,³⁶ fornecido no SINAPI;³⁷ além do custo do transporte do local da obra até o aterro; sendo os valores ajustados ao VPL no fim da vida útil. Para a quantidade do material foi observada igualmente a unidade de custo do material dada no SINAPI. Esta fase foi calculada conforme a Equação 26a.

$$C_d = C_{dem} + C_{tr\ dem} \quad \text{Equação 26a}$$

Onde:

C_d = Custo da desconstrução total na vida útil em R\$;

C_{dem} = Custo em VPL da demolição do edifício na vida útil em R\$ igual à $(\Sigma VPL (m_{iS} \cdot C_d \text{ mat}))$;

$C_{tr\ dem}$ = Custo em VPL do transporte dos materiais de demolição na vida útil em R\$ igual à $(\Sigma VPL (m_i \cdot C_{tr\ matAt}))$;

Portanto, a Equação 26a pode ser equivalente à Equação 26b como segue.

$$C_d = (\Sigma VPL (m_{iS} \cdot C_d \text{ mat})) + (\Sigma VPL (m_i \cdot C_{tr\ matAt})) \quad \text{Equação 26b}$$

Onde:

C_d = Custo da desconstrução total na vida útil em R\$;

m_{iS} = Quantidade do material (i) de construção do edifício na unidade do custo do SINAPI;

$C_d \text{ mat}$ = Custo da desconstrução do material no ano 0 em R\$;

$C_{tr\ matAt}$ = Custo do transporte do material ao aterro em R\$/kg; e

m_i = Quantidade do material (i) de construção do edifício em kg.

Todos os valores ajustados a VPL.

O custos de desconstrução considerados na planilha de composições do SINAPI encontram-se no **Apêndice H.5**. No apêndice é especificado o material ou serviço ao que foram associados na pesquisa.

³⁶ A exceção neste item foi dada ao material tinta para o qual não foi calculado custo de desconstrução, pois assume-se que o mesmo encontra-se associado ao custo da desconstrução do componente ao qual a tinta encontra-se aplicada (parede, forro).

³⁷ São colocados nas planilhas de composição do SINAPI valores de serviços para demolição e retirada dos materiais. Faz-se a ressalva de que não é claro se esses dados consideram ou não empolamento do material.

Para materiais ou serviços não presentes nas planilhas do SINAPI, foram associados os custos de materiais considerados semelhantes. Finalmente, com base na fórmula de Fuller e Petersen (1995), o cálculo do custo no ciclo de vida foi dado pela Equação 27:

$$C_{C_{VE}} = C_i + C_m + C_{opp} + C_d \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

$C_{C_{VE}}$ = Custo total no ciclo de vida energético de dada alternativa em valor presente descontado em R\$;

C_i = Custo total no valor presente líquido/descontado do investimento inicial-R\$;

C_m = Custo total da manutenção no valor presente líquido/descontado em R\$;

C_{opp} = Custo total da energia operacional valor presente líquido/descontado-R\$; e

C_d = Custo total no valor presente líquido/descontado da desconstrução em R\$.

7.1.4 Indicador relacionado ao conforto térmico do usuário

A avaliação relacionada ao aspecto social, que nesta pesquisa se refere a questões ligadas ao conforto térmico do usuário e relacionado ao desempenho térmico da edificação, foi realizada seguindo a metodologia abordada na Etapa 2 desta pesquisa. Foi adotado como indicador os graus-hora para resfriamento e aquecimento; este último somente na cidade de São Paulo. Para tanto, foram levados em conta os resultados da Etapa 2, sendo considerado o valor final da habitação para graus-hora de resfriamento e graus-hora de aquecimento, resultado dos valores ponderados por área dos ambientes de permanência prolongada. Para os casos na cidade de São Paulo, os graus-hora de aquecimento foram considerados em valor absoluto e somados aos valores de graus-hora de resfriamento, por conta de se ter um único indicador relacionado à operação da habitação com ventilação natural. Este indicador foi resultado da fase de uso operacional da edificação. Os resultados dos casos analisados foram exibidos para os três cenários climáticos.

7.1.5 Abordagem integrada proposta

Finalmente, é indicada a forma de conexão dos indicadores propostos por meio de uma abordagem integrada. A abordagem considerou nas entradas aportes relativos a consumo de energia, materiais e transporte em cada uma das fases do ciclo de vida da edificação, levando em conta a vida útil de 50 anos e os quatro indicadores apresentados anteriormente. Os indicadores considerados foram: consumo de energia

no ciclo de vida, emissões de CO₂ no ciclo de vida, custo no ciclo de vida (com base no valor presente líquido) e graus-hora para resfriamento e aquecimento. A Tabela 47 até a Tabela 49 mostram, de forma resumida, as três fases do ciclo de vida da edificação com as suas etapas para cada um dos quatro indicadores propostos, com as fontes dos dados e as ferramentas que foram usadas.

Tabela 47 – Fase pré-uso identificando as etapas, a fonte de dados e as ferramentas usadas para cada indicador proposto na abordagem integrada.

Indicador	FASE PRÉ-USO		
	Etapas	Fonte	Ferramentas
Consumo energético	Energia incorporada na fabricação dos materiais	Preferência por dados brasileiros. Quando não disponíveis dados internacionais ou adaptados ao Brasil	Planilha excel
	Transporte dos materiais até o local	Pesquisa com fabricantes nacionais E-Consturmarket	Planilha excel
	Desperdício dos materiais	Pesquisas nacionais	Planilha excel
	Transporte dos materiais de desperdício	Pesquisa com fabricantes nacionais E-Consturmarket	Planilha excel
Emissões de CO ₂	Emissões de CO ₂ na fabricação dos materiais	Preferência por dados brasileiros. Quando não disponíveis internacionais ou adaptados ao Brasil	Planilha excel
	Emissões CO ₂ do transporte dos materiais até o local	Dados nacionais	Planilha excel
	Emissões de CO ₂ do desperdício dos materiais	Pesquisas nacionais	Planilha excel
	Emissões de CO ₂ do transporte dos materiais de desperdício	Dados nacionais	Planilha excel
Custos	Custo inicial dos materiais	SINAPI	Planilha excel
	Custo do transporte dos materiais até o local	Dados nacionais	Planilha excel
	Custo dos materiais de desperdício	SINAPI	Planilha excel
	Custo do transporte dos materiais de desperdício	Dados nacionais	Planilha excel

Tabela 48 – Fase de uso identificando as etapas, a fonte de dados e as ferramentas usadas por indicador.

Indicador	FASE USO		
	Subetapa	Fonte	Ferramentas
Consumo energético	Consumo para condicionamento ambiental	Simulação termoenergética com cenários climáticos atual e futuro	Energy Plus / JEPlus
	Consumo de outros (somente eletrodomésticos e iluminação)	Com base em dados de pesquisas nacionais	Energy Plus / JEPlus
	Energia incorporada nos materiais para manutenção/reposição	Vida útil com base na NBR 15575	Planilha excel
	Transporte dos materiais para manutenção/reposição	E–Construmarket Dados de pesquisas nacionais	Planilha excel
Emissões deCO ₂	Emissões de CO ₂ por consumo de condicionamento ambiental	Simulação termoenergética com cenários climáticos atual e futuro. PNE 2030	Planilha excel/ Energy Plus / JEPlus
	Emissões de CO ₂ por consumo de outros (somente eletrodomésticos e iluminação)	PNE 2030	Planilha excel/ Energy Plus / JEPlus
	Emissões de CO ₂ dos materiais de manutenção/reposição	Preferência por dados brasileiros. Dados internacionais adaptados ao Brasil ou dados internacionais quando não disponíveis nacionais	Planilha excel
	Emissões de CO ₂ do transporte dos materiais de manutenção /reposição	Pesquisa com fabricantes nacionais Dados de pesquisas nacionais	Planilha excel

Tabela 48 (continuação).

Indicador	FASE USO (continuação)		
	Subetapa	Fonte	Ferramentas
Custos	Custo do consumo para condicionamento ambiental	Simulação termoenergética com cenários climáticos atual e futuro. Dados concessionárias.	Planilha excel/ Energy Plus / JEPlus
	Custo do consumo de outros (somente eletrodomésticos e iluminação)	Dados concessionárias.	Planilha excel
	Custo dos materiais para manutenção/reposição	SINAPI	Planilha excel
	Custo do transporte dos materiais de manutenção/reposição	Pesquisa com fabricantes nacionais Dados nacionais	Planilha excel
Graus-hora de resfriamento e aquecimento	Graus-hora de resfriamento	Simulação termoenergética	Energy Plus / JEPlus
	Graus-hora de aquecimento	Simulação termoenergética	Energy Plus / JEPlus

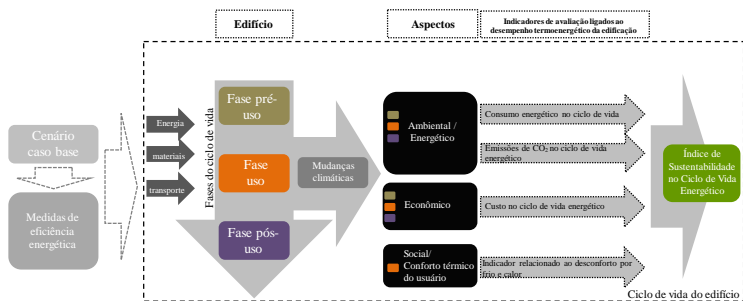
Tabela 49 – Fase pós–uso identificando as etapas, a fonte de dados e as ferramentas usadas por indicador.

Indicador	FASE PÓS_USO		
	Subetapa	Fonte	Ferramentas
Consumo energético	Energia total para desconstrução	Com base na energia incorporada inicial total	Planilha excel
Emissões de CO ₂	Emissões de CO ₂ totais para desconstrução	Com base nas emissões incorporadas inicial total	Planilha excel
Custos	Custo da demolição do edifício	SINAPI	Planilha excel
	Custo do transporte dos materiais de demolição	Pesquisa com fornecedores nacionais Dados nacionais	Planilha excel

Observa-se que na fase de uso operacional os indicadores de consumo energético, emissões de CO₂ e custos consideram os resultados da operação da edificação com uso de AVAC e estão presentes em todas as fases do ciclo de vida. Por outro lado, o indicador de graus-hora na fase de uso operacional expõe os resultados da simulação termoenergética na forma de operação da edificação com ventilação natural e apresenta-se somente na fase de uso. Igualmente, a adaptação às mudanças climáticas tornou-se presente somente na fase de uso e mais especificamente na etapa operacional, por meio dos resultados da simulação termoenergética. Foram avaliados todos os casos com os cenários de clima atual e futuro (2020 e 2050).

A integração de todos os indicadores de desempenho produziu um Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético do edifício, sendo possível o estabelecimento de comparações internas entre o caso base e o mesmo com incorporação de medidas de eficiência energética para adaptação. O índice proposto tem como objetivo dar subsídio às decisões de projeto considerando uma abordagem mais holística. O mesmo não tem como objetivo o estabelecimento de escala de desempenho. A Figura 99 mostra a estrutura para a abordagem integrada proposta com a fronteira do sistema, os aspectos abordados e os indicadores de desempenho.

Figura 99– Estrutura da abordagem integrada proposta.



Nota: As cores marrom, laranja e roxo indicam as fases que são incluídas nos indicadores ligados aos aspectos avaliados.

Ressalta-se que conforme colocado anteriormente o aspecto social está aqui exclusivamente relacionado a um indicador que mostra o desempenho da edificação com ventilação natural e, portanto, ligado ao bem-estar e conforto térmico do usuário. Embora se reconheça que aspectos sociais em estudos de ciclo de vida geralmente abarcam muitos outros indicadores. As avaliações propostas mostraram o desempenho dos casos avaliados de forma comparativa diante de potenciais benefícios e desafios em relação ao tripé de sustentabilidade. Dessa forma, decisões podem ser tomadas com relação aos resultados das opções, de maneira a integrar uma análise mais holística no uso da energia nas habitações de interesse social. A abordagem integrada tomou como base fundamentos de uma avaliação multicritério simplificada, que considera critérios independentes com pesos iguais. Para isso, o Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto combinou todos os indicadores normalizados para permitir comparações entre as opções, ao tempo que mediu o desempenho das estratégias de eficiência energética em relação ao caso base, levando em conta os princípios de sustentabilidade, mudanças climáticas e o ciclo de vida da edificação.

7.1.6 Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético

Os indicadores propostos foram colocados em termos de indicadores finais e indicadores intermediários de avaliação. Os indicadores finais representam o ciclo de vida completo da edificação. Os indicadores intermediários nos aspectos ambiental/energético e econômico mostram o impacto, diferenciando entre impacto incorporado

final nos materiais³⁸ e na operação da edificação. A Tabela 50 mostra os indicadores finais, os intermediários e sua composição com unidades.

Tabela 50 – Indicadores avaliados na abordagem integrada que compõem o índice de sustentabilidade no ciclo de vida energético proposto.

Indicadores finais	Indicadores intermediários	Composição dos indicadores intermediários	Unidade
Consumo de energia no ciclo de vida [E _{CVE}]	Energia incorporada final no ciclo de vida	Energia incorporada inicial [E _I]	MJ
		Energia incorporada recorrente [E _I]	
		Energia para desconstrução [E _d]	
	Energia operacional prevista no ciclo de vida	Energia operacional prevista na vida útil por cenário climático [E _{opp}]	
Emissões de CO ₂ no ciclo de vida energético [Em _{CVE}]	Emissões incorporadas finais no ciclo de vida	Emissões da energia incorporada inicial [Em _i]	kgCO ₂
		Emissões da manutenção [Em _r]	
		Emissões para desconstrução [Em _d]	
	Emissões previstas na operação na vida útil	Emissões na operação [Em _{opp}]	
Graus-hora resfriamento/ aquecimento [GH]	Graus-hora de resfriamento (Fase uso)		Graus-hora
	Graus-hora de aquecimento (valor absoluto) (Fase uso)		
Custo no ciclo de vida energético [C _{CVE}]	Custo do investimento inicial, manutenção e desconstrução	Custo do investimento inicial total [C _i]	R\$
		Custo total da manutenção em VPL [C _m]	
		Custo da desconstrução total em VPL [C _d]	
	Custo operacional previsto VPL na vida útil	Custo operacional em VPL na vida útil [C _{opp}]	

³⁸ Para os indicadores intermediários inclui os resultados da fase de pré-uso, etapa de manutenção da fase de uso e fase de pós-uso.

O indicador final de avaliação do consumo energético no ciclo de vida (E_{CVE}), é composto pelos indicadores intermediários de energia incorporada final e energia operacional no ciclo de vida. A energia incorporada final no ciclo de vida agrupou os resultados de energia incorporada inicial, recorrente e para desconstrução. De forma similar, o indicador final de emissões de CO_2 no ciclo de vida [Em_{CVE}] foi composto da parcela incorporada (inicial, recorrente e desconstrução) e da parcela de emissões operacionais previstas. O mesmo aconteceu com o indicador final de custo no ciclo de vida (C_{CVE}), resultado tanto da parcela de custo de investimento inicial total, custo da manutenção em VPL e custo da desconstrução em VPL, quanto do custo operacional previsto em VPL. De forma diferente, o indicador final de graus-hora total, foi resultado da soma dos graus-hora de resfriamento com os de aquecimento³⁹ (em valor absoluto).

Com base nos indicadores finais, propôs-se um Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético. Acredita-se que, dada a complexidade do tema de sustentabilidade, os indicadores finais devem apresentar peso igual. Dessa forma, adotaram-se todos os indicadores com o mesmo peso (25%).

Os resultados com todos os indicadores foram mostrados inicialmente para cada um dos cenários climáticos avaliados. Entretanto, com o objetivo de obter um único resultado final para a abordagem integrada, os indicadores foram compostos de pesos para cada um dos cenários climáticos analisados, conforme exibe a Tabela 51. Dessa forma, considerou-se a influência de adaptação às mudanças climáticas na avaliação.

Para a produção do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético, que considera mudanças climáticas, foi necessária a normalização dos resultados dos diversos critérios devido a estarem em diferentes unidades. Para isso, foi proposta novamente uma normalização interna que considerasse os limites mínimos e máximos obtidos entre as opções avaliadas para cada indicador, levando em conta os resultados de cada indicador nos três cenários climáticos, conforme a Equação 28.

³⁹ Somente para São Paulo.

Tabela 51 – Critérios avaliados na abordagem integrada que compõem o Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto

Indicadores considerando mudanças climáticas	Peso Indicador	Indicadores finais de avaliação	Unidade	Objetivo	Cenário climático	Peso por cenário
Consumo energético com MC (E_{MC})	25%	Consumo de energia no ciclo de vida	MJ	< menor valor	Atual	33,33%
					2020	33,33%
					2050	33,33%
Emissões de CO₂ com MC (E_{MC})	25%	Emissões CO ₂ no ciclo de vida energético	kgCO ₂	< menor valor	Atual	33,33%
					2020	33,33%
					2050	33,33%
Graus-hora de resfriamento/aquecimento com MC (GH_{MC})	25%	Graus-hora de resfriamento e aquecimento	Graus-horas	< menor valor	Atual	33,33%
					2020	33,33%
					2050	33,33%
Custo no ciclo de vida com MC (C_{MC})	25%	Custo no ciclo de vida energético	R\$	< menor valor	Atual	33,33%
					2020	33,33%
					2050	33,33%

$VN(x) = (x - \text{Min}) / (\text{Max} - \text{Min})$, tal que VN encontra-se entre [0,1]
Equação 28

Onde:

VN = Valor normalizado em cada cenário climático;

x = Resultado do indicador a ser normalizado em cada cenário climático;

Min = Valor mínimo observado nos resultados do indicador considerando os três cenários climáticos;

Max = Valor máximo observado nos resultados do indicador considerando os três cenários climáticos.

Optou-se por considerar todos os cenários climáticos avaliados com o mesmo peso por conta das incertezas associadas. Embora, se observe um peso maior nos cenários climáticos futuros, levando em conta que o cenário de 2020 e 2050 compuseram 66,66% do resultado do indicador. Com essa decisão, embora sejam mantidos pesos iguais, foi

dado maior peso ao desempenho futuro, conforme colocado por vários autores na revisão de literatura.

Foram previstas duas avaliações; a primeira colocando em evidência os indicadores intermediários da Tabela 50 e a segunda com os indicadores finais mostrados na Tabela 50 e na Tabela 51. Entretanto, o Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético foi calculado considerando os indicadores finais. Para a avaliação das opções, o Índice proposto foi tanto numérico quanto gráfico e mostrou o desempenho dos indicadores analisados. No índice gráfico, a menor área representou a melhor opção, levando-se em conta que o melhor desempenho foi obtido quando os indicadores avaliados tenderam a zero e, portanto, ao centro do gráfico. De maneira similar, na sua forma numérica, o menor número foi considerado com o melhor desempenho. Com ele, buscou-se uma avaliação integrada e de fácil compreensão em relação ao desempenho nos diferentes indicadores avaliados. A abordagem proposta para a implementação de medidas de adaptação de eficiência energética pôde ser realizada nos novos projetos de HIS, considerando-se o ciclo de vida energético sustentável da edificação por meio de um balanço adequado que considera indicadores nos aspectos ambiental/energético, econômico e de conforto do usuário relacionados ao desempenho termoenergético, mudanças climáticas e ciclo de vida da edificação. O Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético para cada caso avaliado foi calculado por meio da Equação 29:

$$IS_{CVE} = (E_{MC} + Em_{MC} + GH_{MC} + C_{MC})/4 \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

IS_{CVE} = Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético da edificação considerando mudanças climáticas;

E_{MC} = Consumo de energia no ciclo de vida da unidade considerando mudanças climáticas;

Em_{MC} = Emissões de CO₂ no ciclo de vida energético da unidade considerando mudanças climáticas;

GH_{MC} = Graus-hora anuais (para resfriamento e aquecimento) na fase de uso ponderado para a unidade considerando mudanças climáticas; e

C_{MC} = Custo da unidade no ciclo de vida energético considerando mudanças climáticas.

Sendo que a Equação 29 é resultado da Equação 30.

$$IS_{CVE} = ((E_{CVE \text{ atual}} + E_{CVE2020} + E_{CVE 2050})/3) + ((Em_{CVE \text{ atual}} + Em_{CVE 2020} + Em_{CVE 2050})/3) + ((GH_{\text{atual}} + GH_{2020} + GH_{2050})/3) + ((C_{CVE \text{ atual}} + C_{CVE 2020} + C_{CVE 2050})/3) / 4$$

Equação 30

Onde:

$E_{CVE \text{ atual}} (VN)$ = Consumo de energia no ciclo de vida no cenário atual - VN;

$E_{CVE 2020} (VN)$ = Consumo de energia no ciclo de vida no cenário 2020 - VN;

$E_{CVE 2050} (VN)$ = Consumo de energia no ciclo de vida no cenário 2050 -VN;

$Em_{CVE \text{ atual}} (VN)$ = Emissões de CO₂ no ciclo de vida energético no cenário atual - VN;

$Em_{CVE 2020} (VN)$ = Emissões de CO₂ no ciclo de vida energético no cenário 2020 - VN;

$Em_{CVE 2050} (VN)$ = Emissões de CO₂ no ciclo de vida energético no cenário 2050 - VN;

$GH_{\text{atual}} (VN)$ = Graus-hora para resfriamento e aquecimento no cenário atual -VN;

$GH_{2020} (VN)$ = Graus-hora para resfriamento e aquecimento no cenário 2020 -VN;

$GH_{2050} (VN)$ = Graus-hora para resfriamento e aquecimento no cenário 2050 -VN;

$C_{CVE \text{ atual}} (VN)$ = Custo no ciclo de vida energético no cenário atual -VN;

$C_{CVE 2020} (VN)$ = Custo no ciclo de vida energético no cenário 2020 -VN;

$C_{CVE 2050} (VN)$ = Custo no ciclo de vida energético no cenário 2050 -VN;

OBS. Todos os valores são normalizados.. VN = Valor normalizado.

Os resultados desta etapa são mostrados por cidade para o caso base e para os quatro casos com medidas de adaptação. Para o caso base em Paulo são mostrados com mais detalhes, por fase (pré-uso e uso com manutenção, uso operacional e pós-uso) e posteriormente para os indicadores avaliados, incluindo todas as fases do ciclo de vida. Foi realizada, quando adequado, comparação com resultados de outras pesquisas da revisão de literatura. Resultados dos casos com medidas de adaptação são apresentados de forma mais resumida. O Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético é mostrado para todos os casos. Os resultados são expostos em função dos indicadores finais e intermediários.e para Salvador são mostrados de forma resumida.

7.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados para a cidade de São Paulo os resultados da terceira e última etapa da pesquisa.

7.2.1 Resultados cidade São Paulo: caso base

Os dados do caso base relacionados às avaliações realizadas são mostrados nos Apêndices. O **Apêndice H.6** mostra o quantitativo dos

materiais do caso base dividido por componentes. O **Apêndice H.7** apresenta os dados para todos os materiais usados: densidade, energia incorporada e emissões de CO₂ incorporada com a fonte dos dados, porcentagem de desperdício do material e distância para o transporte do material para São Paulo e Salvador. Para o transporte do desperdício, foram consideradas as distâncias de 36,2 km e 27,3 km para São Paulo e Salvador respectivamente, para a localização do aterro em todos os casos avaliados. O **Apêndice H.8** mostra o custo inicial do levantamento de materiais do caso base na cidade de São Paulo, obtido com o levantamento dos valores no SINAPI.

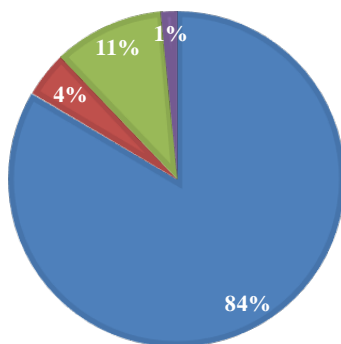
7.2.1.1 Fase pré–uso e fase uso para manutenção

a) Consumo energético na fase de pré-uso e fase de uso para manutenção

A Figura 100a mostra os resultados em porcentagem para cada uma das etapas na fase de pré-uso do caso base na cidade de São Paulo. A Figura 100b exibe os resultados para a energia incorporada, considerando a energia incorporada inicial e recorrente. Os resultados são apresentados para a energia incorporada na produção e na manutenção de materiais de forma separada. Por outro lado, os resultados para transporte e desperdício correspondem aos resultados totais das fases de pré-uso e etapa de manutenção.

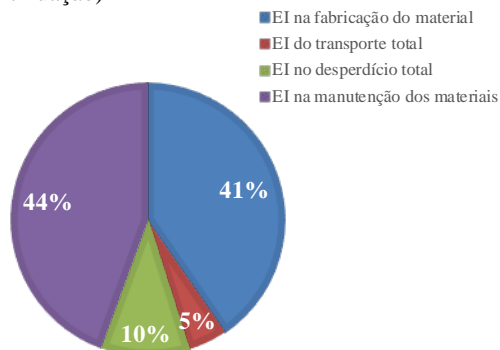
Figura 100 –Energia incorporada para o caso base de São Paulo

■ EI na fabricação dos materiais ■ EI no transporte materiais ao local
 ■ EI no desperdício dos materiais ■ EI no transporte do desperdício



(a) Fase de pré–uso

Figura 100 (continuação)



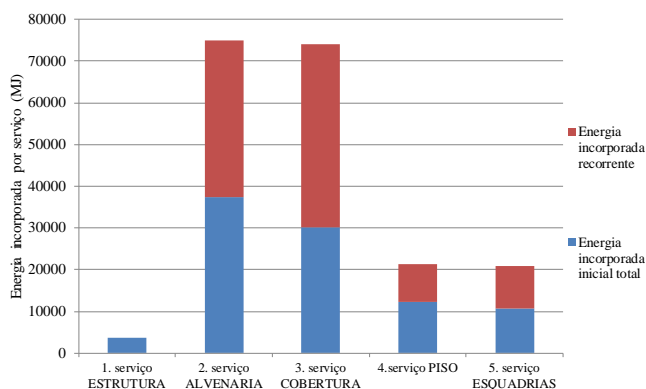
(b) Energia incorporada inicial e recorrente

Nota: EI = Energia incorporada

A energia incorporada na fase de pré-uso (Figura 100) foi estimada em 94,2 GJ, onde a fabricação dos materiais foi de 79,04 GJ, o que correspondeu a 84% da energia incorporada na fase pré-uso. Por outro lado, a energia incorporada na manutenção total foi de 101,03 GJ, sendo nessa parcela 86,7 GJ por causa da energia incorporada para manutenção/reposição dos materiais. Portanto, a soma da energia incorporada no ciclo de vida considerando a inicial e a recorrente foi de 195,25 GJ. A energia incorporada inicial e a de manutenção apresentaram porcentagens semelhantes, sendo 41% para a energia incorporada inicial e 44% para a de manutenção. A parcela relacionada ao desperdício dos materiais representou 10%, enquanto a do transporte dos materiais, 5%. A energia incorporada total por serviço é mostrada na Figura 101.

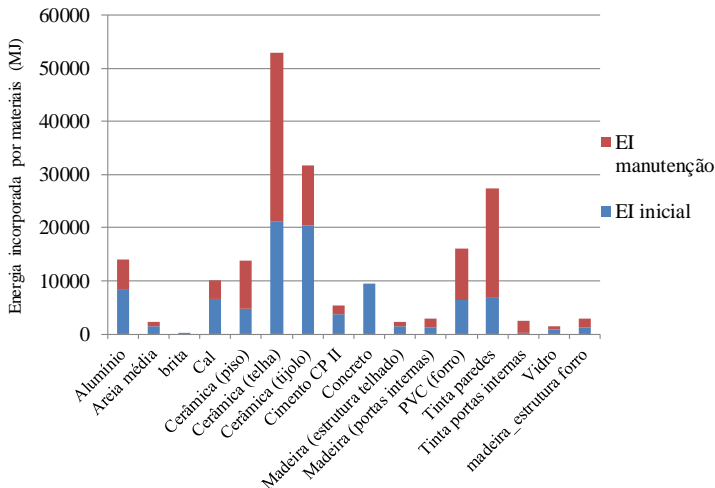
A alvenaria apresentou a maior parcela de energia incorporada (38,4%), contudo similar à da cobertura (37,9%). O piso e as esquadrias ficaram com parcelas similares, de 10,94% e 10,74%. Por último ficou a estrutura, que teve uma participação muito baixa nesta tipologia, sendo ao redor de 2%. O serviço de pintura já estava incluído nos serviços de alvenaria e esquadrias, conforme necessário.

Figura 101 – Energia incorporada inicial e recorrente por serviço para o caso base na cidade de São Paulo



A Figura 102 mostra a energia incorporada total por materiais.

Figura 102 – Energia incorporada total por materiais para o caso base na cidade de São Paulo



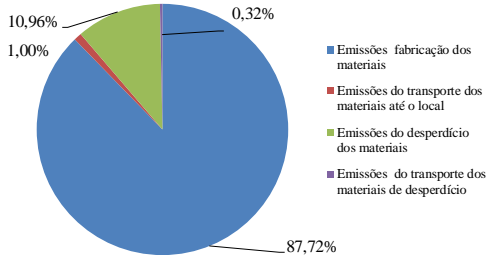
Destacaram-se a telha cerâmica e o tijolo cerâmico, com a maior energia incorporada total entre os materiais: 27,1% e 16,2%, respectivamente. A tinta das paredes também teve alta contribuição (14%), assim como o forro de PVC (8,2%), a cerâmica do piso (7,1%) e

o alumínio das esquadrias (7,2%). O concreto da laje do piso (4,8%) e a cal (5,2%) tiveram contribuição semelhante, em torno de 5%. Ressalta-se que a argamassa foi considerada com a sua composição de materiais, e não como um material único, para ver melhor o efeito de cada material, pois a energia incorporada da argamassa pode mudar muito conforme a sua composição. Se fossem somados todos os materiais que compõem a argamassa ou fosse considerada como um único material, também teria uma porcentagem representativa. E ainda se coloca a observação de o cimento escolhido ser tipo CPII; portanto, com menor energia incorporada por causa da presença de adições.

b) Emissões de CO₂ na fase de pré-uso e fase de uso para manutenção

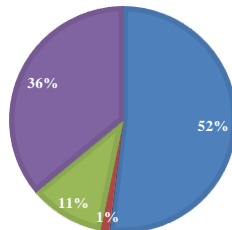
A análise para as emissões de CO₂ incorporado do caso base na cidade de São Paulo é mostrada a partir da Figura 103 até a Figura 105. A Figura 103 exibe os resultados na fase de pré-uso e manutenção divididos por etapas.

Figura 103 – Emissões de CO₂ para o caso base na cidade de São Paulo



(a) Fase de pré-uso

- Emissões incorporadas na fabricação do material
- Emissões no transporte total
- Emissões no desperdício total
- Emissões na manutenção dos materiais



(b) Emissões de CO₂ incorporadas considerando inicial e recorrente

As emissões incorporadas na fase de pré-uso do caso base na cidade de São Paulo foram estimadas em 23,27 tCO₂, das quais 20,41 tCO₂ corresponderam à fabricação dos materiais, ou seja 87,72% (Figura 103a). As emissões na etapa de manutenção foram de 16,1 tCO₂, dos quais 14,19 tCO₂ corresponderam às emissões dos materiais de manutenção/reposição. A soma das emissões incorporadas nas fases de pré-uso e manutenção foi de 39,37 tCO₂. A Figura 103b mostra a distribuição nas emissões totais nessas fases. Com relação à análise energética exposta anteriormente, observa-se que a etapa de emissões incorporadas na fabricação dos materiais apresentou uma porcentagem maior do que as emissões por manutenção dos materiais. A etapa de desperdício mostrou uma porcentagem total em torno de 11%, considerando as emissões incorporadas iniciais e as de manutenção, enquanto as emissões por transporte exibiram a menor porcentagem das emissões. Isso por causa das curtas distâncias observadas para a maioria dos materiais analisados. As emissões totais por serviço podem ser observadas na Figura 104, enquanto por materiais na Figura 105.

Figura 104 – Emissões de CO₂ incorporadas totais por serviço para o caso base na cidade de São Paulo.

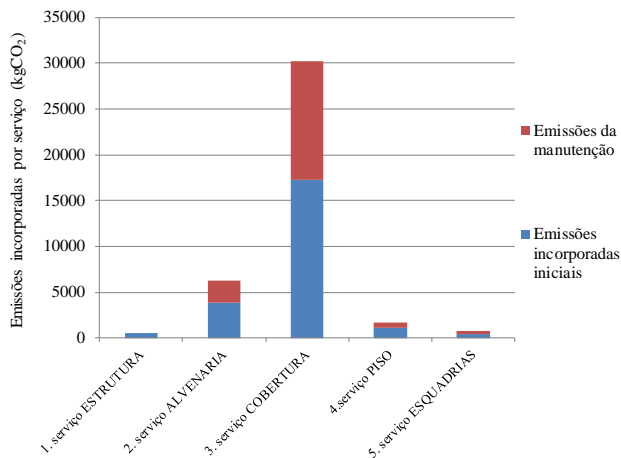
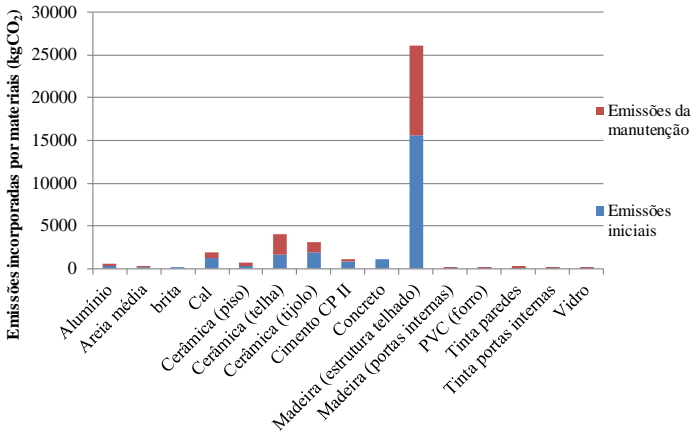


Figura 105 – Emissões de CO₂ incorporadas totais por material para o caso base na cidade de São Paulo.

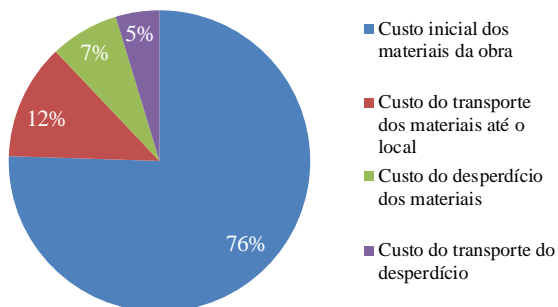


O serviço da cobertura apresentou emissões totais muito superiores às dos outros serviços, em torno de 30,22 tCO₂ ou 76,7 %. Isso se deu por causa, principalmente, da estrutura para o telhado em madeira, pois, ao ter sido especificada como de madeira nativa - com base nos memoriais disponíveis dos projetos analisados no nível de renda 1 - as emissões incorporadas do material foram muito superiores em comparação com os outros materiais. O segundo item com maiores emissões foi o serviço de alvenaria. Por material, além da madeira para estrutura do telhado, destacaram-se a telha cerâmica e o tijolo cerâmico. Novamente, se fossem colocados todos os materiais correspondentes à argamassa de revestimento e assentamento juntos, esses comporiam também uma parcela relevante com relação às emissões.

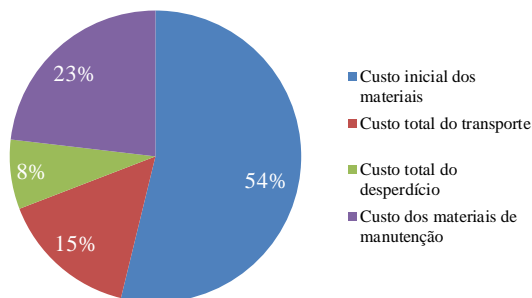
c) Custo na fase de pré-uso e fase de uso para manutenção

A análise para o indicador de custo nas fases de pré-uso e manutenção, manteve a mesma sequência das análises anteriores. A Figura 106a mostra a distribuição do custo em porcentagem para a fase de pré-uso. Por outro lado, a distribuição do custo no projeto considerando juntas a fase de pré-uso e a etapa de manutenção é exibida na Figura 106b.

Figura 106 – Porcentagem do custo na fase de pré-uso e etapa de manutenção para o caso base na cidade de São Paulo



(a) Fase de pré-uso

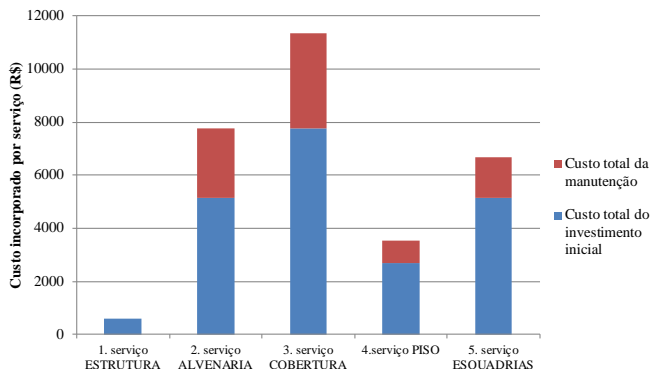


(b) Custo total considerando juntas a fase de pré-uso e etapa de manutenção

Na análise econômica a fase de pré-uso foi estimada em R\$ 21.319,8. O custo inicial dos materiais respondeu por 76% do valor total na fase de pré-uso, o transporte inicial dos materiais por 12%, o desperdício dos materiais por 7% e do custo do transporte do desperdício por 5% (Figura 106a). A fase de manutenção no ciclo de vida considerando o valor descontado foi estimada em R\$ 8.592,3. Na etapa de manutenção a parcela dos materiais respondeu por 80,5%, transporte inicial dos materiais por 8,3%, o desperdício por 8,47% e o transporte do desperdício por 2,65%. E, se consideradas a fase de pré-uso e a de manutenção juntas (Figura 106), o custo inicial dos materiais respondeu por 54%, enquanto a manutenção por metade dele. O custo total do transporte (que inclui o custo inicial, o do desperdício e o da manutenção) representou também uma parcela importante, com 15%, enquanto os custos relacionados ao desperdício tiveram uma parcela menor. Ressalta-se aqui que estão sendo considerados somente os custos relacionados aos componentes da envoltória que estão sendo analisados. A Figura 107

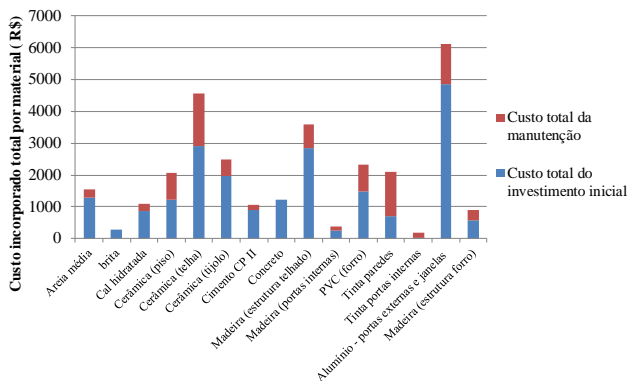
mostra o custo total incorporado por serviço, levando em conta a fase de pré-uso e a etapa de manutenção.

Figura 107 – Custo por serviço na fase de pré-uso e etapa de manutenção para o caso base na cidade de São Paulo



Considerando a fase de pré-uso e etapa de manutenção, a cobertura apresentou o maior custo (38%), especialmente por causa do custo inicial, enquanto a alvenaria (25,9%) e as esquadrias (22,3%) ficaram com porcentagens semelhantes. O piso representou 11,8% do custo e a estrutura o custo mais baixo com 2%. De forma similar às análises anteriores, o serviço de pintura já estava incluído nas alvenarias e nas esquadrias, conforme necessário. A Figura 108 mostra o custo por material, dividido por custo inicial e recorrente ou de manutenção.

Figura 108 – Custo na fase de pré-uso e etapa de manutenção por material para o caso base na cidade de São Paulo



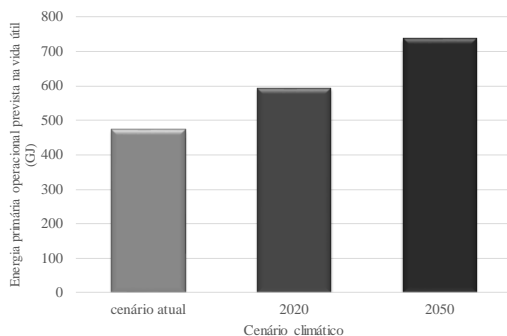
No custo por materiais destacaram-se as esquadrias (janelas e portas externas) (20,48%), por terem sido especificadas de alumínio. Também tiveram uma alta porcentagem o custo da telha cerâmica (15,3%) e a madeira para a estrutura do telhado (11,97%). Porcentagens muito semelhantes observam-se no tijolo cerâmico (8,33%), na tinta das paredes (6,96%), no forro de PVC (7,77%) e na cerâmica do piso (6,90%). Novamente, se fossem considerados todos os materiais relacionados com o reboco e a argamassa de assentamento juntos, também se chegaria a uma porcentagem representativa (12,45%).

7.2.1.2 Etapa operacional

a) Consumo energético operacional

Para a fase de uso, os resultados são mostrados para os três cenários climáticos em análise (atual, 2020 e 2050), considerando a habitação com o uso de condicionamento artificial para atingir as necessidades estimadas de conforto, conforme mencionado na Etapa 2 desta pesquisa. De acordo com os resultados para o consumo energético apresentados na Etapa 2, o consumo do caso base na cidade de São Paulo para o cenário climático considerado atual foi de 916 kWh/ano para eletrodomésticos e iluminação; 760,3 kWh/ano para refrigeração prevista; e 86,9 kWh/ano para aquecimento, tendo um total de 1.763,2 kWh/ano ou 147 kWh/mês, sem contar o consumo para aquecimento de água. A Figura 109 mostra os resultados de consumo de energia primária operacional em GJ para todo o ciclo de vida da edificação em cada cenário climático.

Figura 109 – Resultados do consumo de energia primária na operação total da edificação (50 anos) com o uso de AVAC previsto para os três cenários climáticos analisados do caso base em São Paulo.

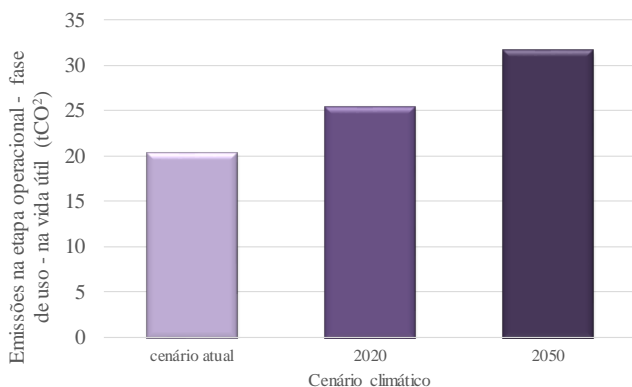


Para 2020, o consumo estimado foi de 2.205,3 kWh/ano ou 184 kWh/mês enquanto para 2050 foi de 2.745,6 kWh/ano ou 229 kWh/mês. Esses valores foram convertidos em MJ adotando o fator de conversão de energia primária para eletricidade no Brasil do PNE 2030. Com isso, ao longo dos 50 anos da vida útil da edificação, obtiveram-se valores de 317,3 GJ de energia secundária ou 472,9 GJ de energia primária para o clima atual, 396,9 GJ de energia secundária ou 591,47 GJ de energia primária para 2020 e 494,2 GJ de energia secundária ou 736,38 GJ de energia primária para 2050. Observa-se aumento da energia operacional (considerando consumo para AVAC, equipamentos e iluminação) nos cenários de mudança climática de 55%, comparando os valores de consumo de energia primária no cenário atual e de 2050.

b) Emissões de CO₂ operacionais

A Figura 110 mostra os resultados com relação às emissões na operação para os três cenários climáticos.

Figura 110 – Resultados das emissões relativas ao consumo de energia na operação total da edificação com o uso de AVAC para os três cenários climáticos analisados do caso base em São Paulo



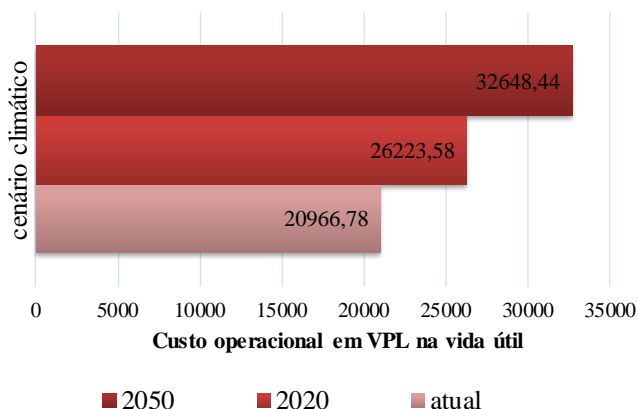
Na fase de uso, as emissões considerando o consumo no ciclo de vida de energia primária foram de 10,56 tCO₂ para equipamentos e iluminação, enquanto para condicionamento ambiental previsto foram de 9,77 tCO₂ no cenário de clima atual, 14,86 tCO₂ para 2020 e 21,09 tCO₂ para 2050. Observa-se, portanto, na fase de uso um aumento das emissões totais da operação que passou de 20,33 tCO₂ no cenário do clima atual

para 31,66 tCO₂ no cenário de 2050 ou, conforme esperado, um aumento de 55%. Assim, nos cenários futuros as emissões por causa do condicionamento ambiental previsto superariam as emissões pelo uso de equipamentos e iluminação.

c) Custo operacional

A Figura 111 mostra os custos no consumo de energia relativos à operação da edificação nos diferentes cenários climáticos.

Figura 111 – Resultados dos custos relacionados ao consumo de energia na operação total da edificação (50 anos) com uso de AVAC para os três cenários climáticos analisados do caso base em São Paulo



Conforme os resultados apresentados de consumo operacional na Etapa 2, calculou-se o custo inicial anual do consumo energético para a operação do caso base na cidade de São Paulo de R\$ 531,31 para equipamentos e iluminação e R\$ 491,36 para condicionamento ambiental total previsto ao ano no cenário climático atual, ou seja, um total inicial anual de R\$ 1.022,68. Salienta-se que não foi considerado o consumo para aquecimento de água e que o consumo de equipamentos e iluminação considerou-se fixo para todos os cenários climáticos. Para o cenário de 2020, o consumo inicial total anual foi de R\$ 1.279,09 e para o cenário de 2050, de R\$ 1.592,47, ou seja, partindo-se do cenário climático atual ao de 2050, obteve-se aumento de aproximadamente 55%, conforme colocado anteriormente. De acordo com o ciclo de vida total nos 50 anos da edificação e pela metodologia do valor presente líquido, o custo

previsto para eletrodomésticos e iluminação foi de R\$ 10.892,92 e para condicionamento ambiental no cenário de clima atual foi de R\$ 10.073,86, ou seja, na vida útil do cenário climático atual o custo total de operação foi de R\$ 20.966,78. No cenário de 2020 o custo foi de R\$ 26.223,58 e no cenário de 2050 foi de R\$ 32.648,44. Assim, levando-se em conta a metodologia adotada de valor presente líquido ou descontado, somente nos cenários climáticos futuros, o custo de energia operacional sobrepassou o custo na fase de pré-uso.

d) Graus-hora de resfriamento e aquecimento

A Tabela 52 mostra os resultados de graus-hora para o caso base na cidade de São Paulo nos três cenários climáticos analisados.

Tabela 52 – Resultados de graus-hora para o caso base de São Paulo

	Média ponderada para os três ambientes cenário climático atual	Média ponderada para os três ambientes cenário 2020	Média ponderada para os três ambientes cenário 2050
Graus-hora de resfriamento (1)	2.446	4.587	7.490
Graus-hora de aquecimento (2)	-2.289	-400	-116
Graus-hora de aquecimento (em valores absolutos) (3)	2.289	400	116
Soma total de graus-hora(1+3)	4.735	4.987	7.606

Observa-se que a soma total de valores de graus-hora para os cenários climático atual e de 2020 mostrou uma diferença menor do que a do cenário de 2050. Isso se deu por conta de considerar-se o aquecimento em valor absoluto para a soma total e da redução drástica que mostra o mesmo para o cenário de 2020 em comparação com o cenário atual.

7.2.1.3 Fase pós-uso

a) Consumo energético no pós-uso

A fase de pós-uso obteve 9,42 GJ de consumo de energia primária. A soma total do consumo energético considerando as fases de pré-uso, etapa de manutenção e fase de pós-uso foi de 204,67 GJ. Levando em conta o cenário climático atual, o consumo energético no ciclo de vida total da edificação foi de 677,57 GJ, ou seja, a fase de pós-uso correspondeu a 1,4% do total. Tendo em conta somente a soma das fases de pré-uso, da etapa de manutenção e da fase de pós-uso, a fase de pós-uso representou 4,6%.

b) Emissões de CO₂ no pós-uso

As emissões na fase de pós-uso foram de 2,32 tCO₂ que corresponderam a 5,58%, considerando a soma das emissões nas fases de pré-uso, manutenção e pós-uso. No cenário climático atual e levando em conta todo o ciclo de vida, as emissões na fase de pós-uso representaram 3,75%.

c) Custo no pós-uso

Na análise econômica e considerando a demolição nos 50 anos, o custo da fase de pós-uso ou desconstrução, aplicando o valor presente líquido ou descontado, foi estimado em R\$ 737,9. Conforme a metodologia de cálculo adotada, a fase de pós-uso correspondeu a 3,46% do custo do investimento inicial na fase de pré-uso. Levando em conta o cenário climático atual, a fase de pós-uso correspondeu a aproximadamente 1,5% do custo todo no ciclo de vida do caso base em São Paulo. Este valor pode parecer em um primeiro momento baixo, porém pode ser explicado pela diferença entre o valor adotado para a inflação e a taxa de desconto. Caso os dois fossem iguais, o custo em VPL da fase de pós-uso seria igual ao custo de desconstrução hoje. Por outro lado, pesquisas de custos no ciclo de vida de edificações têm mostrado valores também baixos para esta fase. A pesquisa de Islam (2012) mostrou o custo na fase de pós-uso sendo de 2,69% do total no ciclo de vida. De outro lado, muitas pesquisas que mostram análise de custos no ciclo de vida das edificações são de países onde as taxas de inflação e taxa

de desconto apresentam valores similares. Isto faz com que aumente a participação da fase de pós-uso no custo total do ciclo de vida.

7.2.1.4 Discussão dos resultados do caso base na cidade de São Paulo

Nesta seção são discutidos com mais detalhes os resultados anteriormente apresentados dos indicadores avaliados para o caso base na cidade de São Paulo. São considerados os resultados em todo o ciclo de vida da edificação e nos três cenários climáticos. Os resultados com relação ao indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento para o caso base da cidade de São Paulo já foram discutidos na Etapa 2 desta pesquisa.

a) Consumo energético no ciclo de vida

São mostradas em porcentagens, as principais parcelas que compõem o ciclo de vida energético da edificação para os três cenários de mudança climática. A Figura 112 exibe os resultados para o cenário climático atual e a Figura 113 para o cenário de 2050.

Figura 112 – Ciclo de vida energético para o caso base em São Paulo no cenário climático atual

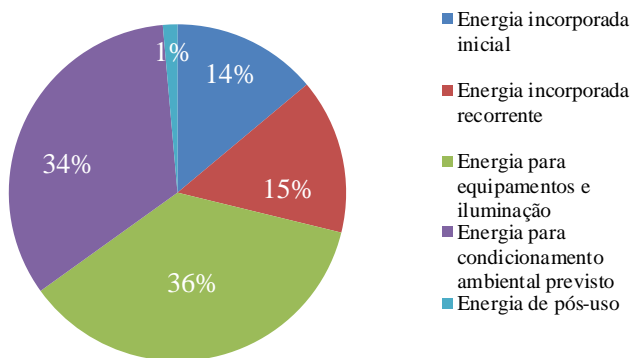
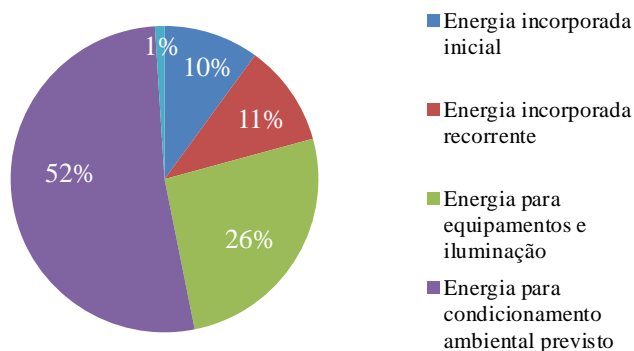


Figura 113 – Consumo de energia por etapas do ciclo de vida para o caso base em São Paulo no cenário climático 2050



A energia total no ciclo de vida passou de 677,57 GJ no clima atual para 796,13 GJ no cenário de 2020 até 941,05 GJ no cenário climático de 2050. Isso sem contar o consumo de aquecimento de água ou cocção, conforme colocado anteriormente. Considerando os valores por m^2 no cenário climático atual, esses ficaram em torno de 2,37 GJ/m^2 na fase de pré-uso (energia incorporada inicial), 2,54 GJ/m^2 para a energia de manutenção e 11,89 GJ/m^2 para a energia de operação (AVAC, equipamentos e iluminação), ou seja, 14,44 GJ/m^2 para a fase de uso (energia recorrente e de operação) e 0,23 GJ/m^2 para a fase de pós-uso. Para 2020, a fase de uso ficou em 17,42 GJ/m^2 ; e, para 2050, em 21,07 GJ/m^2 .

A energia incorporada inicial e a de manutenção apresentaram parcelas muito similares, representando juntas 29% no total do ciclo de vida do caso base no cenário climático atual. Igualmente nas duas etapas, a maioria da energia incorporada referiu-se à fabricação e à manutenção dos materiais. Isso mostra a importância tanto dos materiais que são especificados no início quanto da durabilidade dos materiais usados para conseguir reduzir a manutenção necessária. Muitas vezes, não são usados nesse tipo de construção materiais com alta qualidade, o que poderia incrementar ainda mais a importância da etapa de manutenção.

Por outro lado, ressalta-se a importância do desempenho térmico da edificação quando considerado o ciclo de vida e, ainda mais as mudanças climáticas. No clima considerado atual, a energia para condicionamento ambiental previsto e a energia necessária para equipamentos e iluminação apresentaram parcelas muito similares, ocupando as maiores porcentagens no ciclo de vida energético da

edificação. A parcela de equipamentos e iluminação mostra potencial alto de economia na vida útil, na medida em que continue o incremento de incorporação de equipamentos eficientes nas habitações de interesse social, programa que já acontece na atualidade com as geladeiras e poderia ser estendido a outros equipamentos. Igualmente, economias significativas podem ser obtidas na iluminação com a maior entrada e a redução no preço de lâmpadas mais eficientes no mercado, como os LEDs, tendência que está sendo observada na atualidade. Contudo, ao colocar a influência das mudanças climáticas, ficou evidente a relevância do desempenho da edificação, pois a parcela de condicionamento ambiental previsto, que no clima atual foi de 34% no ciclo de vida, passou a representar a metade no consumo de energia no ciclo de vida da edificação, com 52% no cenário de 2050. Isso, desde a perspectiva de análise energética, mostrou a ênfase que deve ser dada nas considerações de projeto nos materiais iniciais para alcançar um desempenho térmico mais adequado no ciclo de vida da edificação.

Por outro lado, com relação à energia incorporada por serviço e material, destacaram-se, em primeiro lugar, o serviço de alvenaria considerando o tijolo das paredes, tinta e os componentes da argamassa; e, em segundo lugar, a cobertura junto à telha cerâmica e ao forro. Tanto a composição da alvenaria quanto a da cobertura foram fundamentais para o desempenho térmico da edificação na etapa de operação. Dessa forma, deveria ser dada maior atenção aos projetos dessa tipologia na especificação, principalmente desses dois componentes. Nessa tipologia a estrutura não cobra apresenta muita importância, o que pode ser diferente para outras tipologias, conforme resultados de estudos levantados na revisão de literatura. A energia incorporada total (inicial e recorrente) passou de 29% do ciclo de vida no cenário climático atual, ou 4,91 GJ/m², para 21% no cenário de 2050.

Estudos brasileiros dessa tipologia apresentaram resultados semelhantes em porcentagens e destaque de materiais e serviços no ciclo de vida. Contudo, os valores com essas pesquisas são comparáveis em relação à energia incorporada, mas não de forma muito direta à energia operacional. Algumas pesquisas brasileiras consideraram a cocção na energia operacional e o aquecimento de água, além de que, normalmente desconsideraram o uso de condicionamento ambiental previsto nesta tipologia. Igualmente, não tomaram como metodologia para o cálculo da fase de uso a simulação termoenergética. Na pesquisa de Paulsen e Spoto (2013) a energia incorporada total foi de 7,6 GJ/m² com porcentagem de 30%. Os pesos dos serviços do edifício foram similares. Por material, a

cerâmica vermelha, a argamassa, a telha cerâmica e a tinta apresentaram os maiores valores. No caso dos autores, também foram considerados no levantamento somente os materiais da envoltória. Diferenças nos resultados por metro quadrado podem ser atribuídas à especificação de alguns materiais, como a escolha de valores de energia incorporada, valores de densidade de massa aparente de materiais e distâncias por se tratar de outra cidade, no caso dos autores de Brasília. Ainda mais, observou-se no trabalho que os valores de densidade de massa aparente afetam, em muito, a quantidade de materiais por peso, o que pôde alterar alguns resultados com relação à predominância do material nas etapas. No caso de Paulsen e Sposto (2013), a energia operacional foi de 17,5 GJ/m², sendo 11,6 GJ/m² para eletricidade. A energia operacional, no caso dos autores, excluiu o uso final de condicionamento artificial, porém incluiu o consumo energético com cocção e com aquecimento de água. Por outro lado, no modelo 1 de Tavares (2006), a cerâmica vermelha também teve predominância na energia incorporada inicial entre os materiais; contudo, no ciclo de vida as tintas mostraram-se dominantes. Para o autor, o cimento mostrou alta energia incorporada e maior quantidade de uso, tendo assim alta representação no estudo de caso do modelo de baixa renda. Apesar das diferenças levantadas, os valores gerais no ciclo de vida foram semelhantes entre o caso base que está sendo analisado e as pesquisas dos autores mencionados.

Com relação aos valores internacionais, a pesquisa de Ramesh et al. (2010) que compilou resultados de várias pesquisas internacionais, mostrou que a energia incorporada total ficava na faixa de 10% a 20% do ciclo de vida, enquanto a energia de operação, entre 80% e 90%. Os valores dos autores mostraram que a energia primária no ciclo de vida das edificações avaliadas ficaram em torno de 27 a 72 GJ/m², considerando 50 anos para edifícios residenciais convencionais. Isso mostra valores que podem estar muito acima do consumo energético no ciclo de vida alcançado no caso base desta pesquisa para o cenário climático atual na cidade de São Paulo (de 17,05 GJ/m²), assim como de outras pesquisas nacionais. Isso pode ser explicado por causa da alta parcela de consumo operacional previsto com condicionamento ambiental, pois a maioria das pesquisas internacionais é de edificações em climas extremos. As porcentagens dos estudos internacionais indicaram que a energia incorporada no caso base em estudo para a cidade de São Paulo pode ser maior do que os valores de alguns estudos internacionais. Por outro lado, o consumo energético na operação apresentou valores muito menores do que os internacionais. A Tabela 53 exibe uma comparação dos resultados

alcançados na análise energética nesta pesquisa no caso base para a cidade de São Paulo, com resultados de pesquisas nacionais e internacionais. Os resultados desta pesquisa são mostrados para o cenário climático atual com a porcentagem de cada fase.

Tabela 53 – Comparação entre os resultados encontrados no caso base analisado no cenário climático atual e pesquisas nacionais e internacionais.

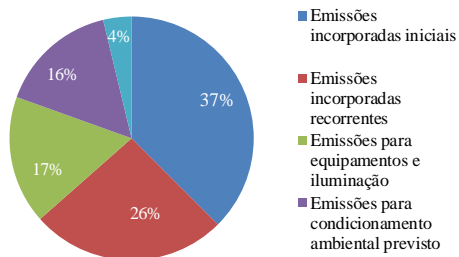
Autor	Pré-uso	Uso	Pós-uso	Total no ciclo de vida	Energia incorporada total ⁴⁰	Energia operacional
	GJ/m ² (%)	(GJ/m ²) %	(GJ/m ²) %	(GJ/m ²)	(GJ/m ²) %	(GJ/m ²) %
Caso base SP cenário climático atual	2,37 (13,9%)	14,44 (84,7%)	0,23 (1,39%)	17,05 (100%)	4,91 (29%)	11,89 (70%)
Tavares (2006)	4,6 (23,11%)	13,5 (72,6%)	0,5 (2,63%)	18,6 (100%)	7,07 (38%)	11,0 (59%)
Paulsen (2013)	3,8 (15%) 15	21,3 (84%)	0,3 (1,10%)	25,4 (100%)	7,6 (30%)	17,5 (69%)
Ramesh et al. (2010)				27,0 – 72,0	(10–20%)	(80–90%)

b) Emissões de CO₂ no ciclo de vida

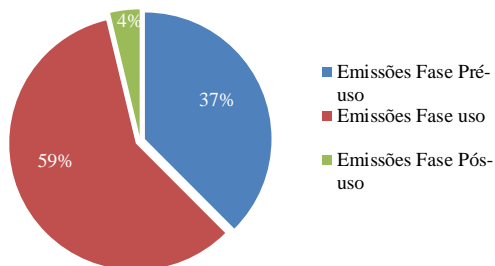
A Figura 114 mostra as emissões no ciclo de vida, destacando as principais etapas no cenário climático atual e de 2050.

⁴⁰ Inclui inicial e de manutenção.

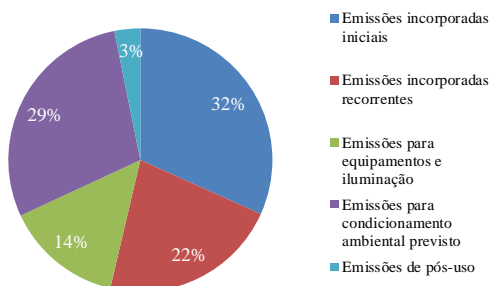
Figura 114 – Emissões de CO₂ por conta do consumo de energia para o caso base em São Paulo.



(a) Cenário climático atual



(b) Cenário climático atual



(c) Cenário climático 2050

As emissões totais no ciclo de vida considerando o cenário atual foram de 62,03 tCO₂, enquanto em 2020 passaram a ser de 67,13 tCO₂ e no cenário de 2050, de 73,36 tCO₂. Ou seja, mostraram aumento de 18% quando comparado o cenário climático atual com o de 2050. As emissões

por causa da parcela incorporada inicial na fase de pré-uso mantiveram-se ao longo dos cenários climáticos como a maior parcela em porcentagem no ciclo de vida. Isso mostra a importância da especificação de materiais com menores emissões incorporadas; no entanto, é necessário que mantenham desempenho adequado, tanto térmico quanto de durabilidade ao longo do ciclo de vida. Tal é o caso da especificação de materiais como a madeira nativa, que apresenta alta emissão incorporada, sendo facilmente substituída por madeira plantada. Caso fosse especificada uma madeira plantada, o serviço da cobertura ainda apresentaria a maior emissão, porém seguida muito de perto do serviço de alvenaria. Contudo, as emissões previstas para condicionamento ambiental no ciclo de vida passaram de 16% no cenário climático atual para 29% ou aproximadamente 1/3 do total do ciclo de vida no cenário de 2050, ficando com porcentagem similar à das emissões incorporadas iniciais dos materiais. Para valores por m² no cenário climático atual, a fase de pré-uso ficou em 0,58 tCO₂/m², enquanto as emissões por causa da manutenção, em 0,40 tCO₂/m². Por outro lado, as emissões operacionais (equipamentos, iluminação e AVAC previsto) para o cenário climático atual ficaram em 0,51 tCO₂/m². Assim, as emissões totais no ciclo de vida considerando o cenário climático atual foram de 1,56 tCO₂/m². Para o cenário de 2020, as emissões totais no ciclo de vida passaram a ser 1,68 tCO₂/m² e para o cenário de 2050, de 1,84 tCO₂/m². Embora a fase de pré-uso tenha alcançado alta porcentagem, a fase de uso total (operacional e de manutenção) continuou tendo porcentagem maior, ainda no cenário climático atual, de 59%. Para 2050 essa fase representou 65% do total de emissões no ciclo de vida. Dessa forma, e similarmente à análise energética, devem ser especificados os materiais tendo em mente a fase de uso em questões de desempenho térmico e durabilidade, assim como deve ser dada maior atenção aos componentes da cobertura e da alvenaria, por serem os que apresentaram a maior emissão incorporada no ciclo de vida.

Em algumas pesquisas brasileiras que consideraram a mesma tipologia foram observados valores menores por m² quando comparados com os resultados do cenário atual. A pesquisa de Tavares (2006) mostrou no modelo 1 unifamiliar de baixa renda valores de emissões no ciclo de vida de 1,04 tCO₂/m², sendo 0,38 tCO₂/m² de emissões incorporadas iniciais, 0,59 tCO₂/m² de emissões incorporadas totais, 0,45 tCO₂/m² para a etapa operacional e 0,04 para a fase de desconstrução. Entretanto, as porcentagens relativas a parcelas como a fase de pré-uso e operacional foram semelhantes. Na fase de pré-uso o autor encontrou porcentagens

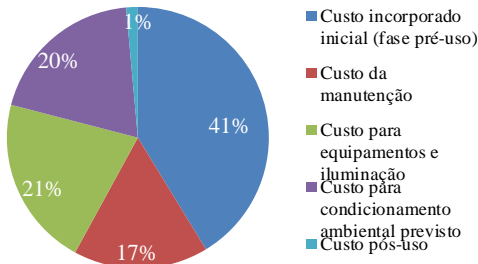
em torno de 36,5% e na etapa de manutenção, de 20% do total do ciclo de vida. Por outro lado, foram encontrados valores semelhantes a esta pesquisa nos resultados de Caldas et al. (2015), em que foi analisada uma habitação de interesse social em Brasília cujo ciclo de vida teve 1,84 tCO₂/m². Para os autores, a fabricação dos materiais teve porcentagem em torno de 36% e a de manutenção também em torno de 30%. Por outro lado, Stachera Jr (2008) chegou a um valor médio de emissões de CO₂ na fase de construção para uma casa de habitação popular no estado do Paraná de 0,22 tCO₂/m², sem contar transporte. Esse valor é inferior ao valor encontrado nesta pesquisa, onde a fase de pre-uso obteve o valor de 0,58 tCO₂/m² para o caso base em São Paulo. Contudo, o valor do autor só contou alguns materiais principais, e não está contando a estrutura do telhado, que no caso da pesquisa atual foi a que apresentou o maior valor. Por outro lado, Garcia (2014), mostra na sua pesquisa a emissão média para uma casa de alvenaria na construção atual no Brasil em 0,203 tCO₂/m² de superfície útil, porém coloca uma faixa de variação entre (entre 10 y 691 kgCO₂/m² de superfície útil). Os resultados aqui colocados ficam dentro dessa faixa apontada pela autora. A discrepância dos valores de energia incorporada inicial observados na pesquisa atual com relação aos estudos brasileiros atribui-se à alta emissão incorporada na estrutura do telhado, por utilizar-se madeira nativa. Da mesma forma, tomou-se como referência para o valor de emissão de CO₂ o material apresentado por Garcia (2014), que mostra valores de emissões de CO₂ para esse material muito superiores a outras referências nacionais encontradas. Entretanto considerou-se adequado o seu uso por se tratar de uma referência recente na área e com dados primários. Caso fosse adotada madeira plantada no lugar de nativa, as emissões incorporadas na fase de pré-uso chegariam a valores semelhantes aos encontrados por Stachera Jr (2008) e Garcia (2014). Embora os estudos acima relacionados tenham pesquisado também habitações de interesse social, as diferenças são observadas por causa de fontes de dados assumidos, suposições, materiais e etapas. Pesquisas internacionais como a de Cuéllar–Franca e Azapagic (2012) mostraram valores no ciclo de vida de 50 anos para as casas típicas inglesas entre 309 a 455 tCO₂eq, ou seja, entre cinco e sete vezes superiores ao encontrado no caso base analisado; entretanto, perto de 90% desse valor correspondente à fase de uso. Por outro lado, 9% desse valor foi das emissões incorporadas que corresponderam a valores aproximados entre 27 tCO₂eq e 40 tCO₂eq, sendo o valor mínimo, similar às emissões incorporadas encontrado no caso base analisado. Isso explica-se pelas necessidades de consumo energético maior na etapa

operacional das edificações nos países com climas frios, em especial por causa do aquecimento, conforme já colocado.

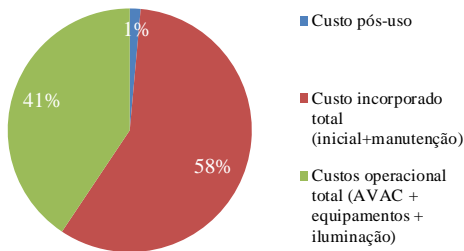
c) Custo no ciclo de vida

As parcelas que compõem o ciclo de vida na análise econômica dos três cenários climáticos são mostradas na Figura 115. As duas primeiras figuras referem-se ao cenário de clima atual e a última ao de 2050.

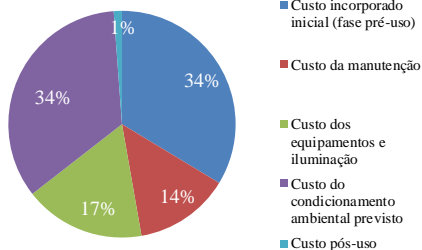
Figura 115 – Etapas para avaliação de custos no ciclo de vida do caso base em São Paulo.



(a) Cenário climático atual



(b) Custo incorporado vs. operacional no ciclo de vida no cenário atual



(c) Cenário climático 2050

O custo total no ciclo de vida no cenário climático atual passou de R\$ 51.606,7 para R\$ 56.863,5 no cenário climático de 2020 até R\$ 63.288,4 no cenário climático de 2050, ou seja, observou-se um aumento de 22,6% por causa do aumento no consumo da energia operacional quando comparado o cenário de clima atual com o de 2050. Cabe ressaltar novamente que os valores aqui considerados não foram os valores absolutos da obra total e que na energia operacional não foi contado o custo com aquecimento de água e cocção. Dessa forma, devem ser vistos como valores comparativos, e não totais. O custo com energia para condicionamento ambiental passou de 20% do custo total no ciclo de vida no cenário climático atual para 34% no cenário de 2050, tendo, portanto, um aumento de quase o dobro na porcentagem de participação no ciclo de vida. Com isso, chegou a constituir uma parcela de mesma relevância do custo inicial dos materiais em 2050. Ao considerarem-se os custos por m² no cenário climático atual, a fase de pré-uso representou R\$ 536,23/m²; a de manutenção, R\$ 216,21/m²; e a de pós-uso; R\$ 18,56/m². A etapa operacional representou no cenário de clima atual R\$ 527,59 por m²; em 2020, R\$ 659,87; e em 2050, R\$ 821,55.

Embora tenha dado alta a porcentagem do custo inicial (fase pré-uso) dos materiais nesta análise, a fase de uso considerando os custos operacionais e os de manutenção correspondeu a uma parcela maior no ciclo de vida. A fase de uso representou 57% no cenário climático atual, 61% em 2020 e 65% em 2050. No cenário de 2050 a parcela correspondente ao custo com condicionamento ambiental previsto ficou igual à parcela correspondente ao custo inicial dos materiais considerando o ciclo de vida. Assim, desde o ponto de vista de análise econômica, deveriam ser pensados os materiais com maior durabilidade e que proporcionem melhor desempenho térmico em longo prazo. Também os custos com iluminação e equipamentos, que ocuparam praticamente a mesma porcentagem dos custos com condicionamento ambiental previsto no cenário climático atual, passaram a representar a metade do custo previsto com AVAC no cenário de 2050. A importância da fase de uso na habitação, tanto no cenário atual quanto futuros, reforça a necessidade de uma mudança de paradigma com relação à importância dada aos custos iniciais nas habitações que estão sendo construídas no programa nacional de habitação de interesse social. Nestes programas, devem ser priorizadas especificações que garantam um bom desempenho na fase de uso da edificação, tanto operacional, quanto por conta da manutenção dos materiais.

No custo por serviço e material incorporado destacaram-se novamente os serviços de cobertura e alvenaria. Contudo, teve muita importância a questão das esquadrias em função do material usado. No setor residencial as esquadrias afetaram o desempenho da habitação, não tanto em função do material em si, mas por causa dos mecanismos a ela incorporados, como, por exemplo, sombreamento; dessa forma esse é um item relevante na escolha do projeto. Observa-se que, como esperado, a estrutura nessa tipologia, por conta da especificação no projeto não representou uma porcentagem importante no ciclo de vida econômico.

Poucas pesquisas nesse setor no Brasil têm abordado custos no ciclo de vida na habitação de forma global. Igualmente, por estarem sendo levantados todos os custos da habitação, não puderam ser realizadas comparações de forma direta. Triana e Lamberts (2013) apresentaram o custo inicial com todos os materiais levantados para uma casa tipo de 36 m² da Cohab SC em torno de R\$ 25.500, com base no levantamento de custos feito pela própria Cohab SC em 2009. Nesse mesmo levantamento mostrado pelos autores as maiores porcentagens de custos corresponderam às paredes, com 14,6%; coberturas, com 14%; esquadrias, com 12%; pinturas, com 9%; e revestimento como argamassa e reboco, com 10%. Também entre os orçamentos fornecidos pelas companhias de habitação para a primeira etapa desta pesquisa, uma das habitações da amostra da região Sul mostrou o custo global da casa de 37 m² em aproximadamente R\$ 39.000,00, em que o serviço de alvenaria correspondeu a 13%; as esquadrias, a aproximadamente 7%; o telhado, a 10%; e as pinturas, a 6%. Mesmo sem poder fazer comparações diretas, os resultados obtidos no caso base levantado mostraram a maior relevância nos mesmos serviços, embora no caso base para a cidade de São Paulo a cobertura tenha sido aquela com a maior porcentagem de custo. Finalmente, na Tabela 54 são exibidos todos os indicadores finais do caso base nos três cenários climáticos avaliados. Todos os indicadores são apresentados nas unidades próprias de cada avaliação.

Tabela 54 – Indicadores avaliados nos cenários atual e de mudança climática para o caso base da casa unifamiliar isolada em São Paulo.

Cenário climático atual				
Caso Nº	Energia no ciclo de vida [E _{CVÉ} atual] (MJ)	Emissões no ciclo de vida [Em _{CVÉ} atual] (kgCO ₂)	Somatória de graus-hora (resfriamento e aquecimento) Atual	Custo no ciclo de vida (R\$) Atual
Caso base	677.573,1	62.035,1	4.735	51.606,7

Cenário climático 2020				
Caso Nº	Energia no ciclo de vida [E _{CVÉ} 2020] (MJ)	Emissões no ciclo de vida [Em _{CVÉ} 2020] (kgCO ₂)	Somatória de graus-hora (resfriamento + aquecimento) 2020	Custo no ciclo de vida (R\$) 2020
Caso base	796.1390	67.133,5	4.987	56.863,5

Cenário climático 2050				
Caso No	Energia no ciclo de vida [E _{CVÉ} 2050] (MJ)	Emissões no ciclo de vida [Em _{CVÉ} 2050] (kgCO ₂)	Somatória de graus-hora (resfriamento + aquecimento) 2050	Custo no ciclo de vida (R\$) 2050
Caso base	941.050,1	73.364,6	7.606	63.288,39

7.2.1.5 Resultados para todos os casos analisados na cidade de São Paulo

Nesta seção são mostrados os resultados do desempenho dos quatro casos avaliados com a introdução de medidas de eficiência energética frente ao caso base, para adaptação às mudanças climáticas na cidade de São Paulo. Nos Apêndices H.9 a H.11 são exibidos os dados mais específicos relacionados às avaliações para os casos (1 a 4) analisados em São Paulo e Salvador. O **Apêndice H.9** mostra o quantitativo dos materiais usados. O **Apêndice H.10** mostra o custo dos

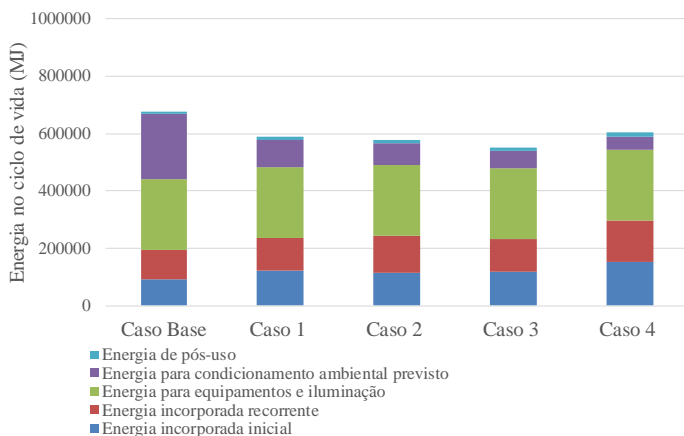
materiais para os casos de São Paulo. Por último, o **Apêndice H.11** trata do custo dos materiais para os casos de Salvador.

Os quatro casos avaliados para São Paulo apresentaram a incorporação de medidas de adaptação de eficiência energética relacionadas a uma orientação adequada, absorvância solar das paredes externas, diferentes transmitância e composição de paredes externas e internas, cobertura, forro e sombreamento das esquadrias, conforme descrito na seção 7.1.1 na Tabela 39. Com relação às paredes foram avaliados quatro tipos de paredes, em que cada caso apresentou um tipo diferente de parede (dupla de madeira com isolante, alvenaria de tijolo com maior espessura do que o caso base, parede dupla de tijolo com câmara de ar e parede em concreto com isolante na face externa). Dentre as coberturas, foram avaliados dois tipos: metálica com absorvância solar 0,3 e telha de barro clara com absorvância solar 0,5, ambas com uma camada de isolante em lã de rocha com 5 cm. Os forros nos casos analisados foram de madeira e laje mista com EPS. E, nas esquadrias, a variação com relação ao caso base esteve na presença de venezianas e, esquadrias com maior dimensão somente no caso 4. Todos os casos possuíam venezianas nas janelas dos quartos e dois deles também nas janelas da sala de estar/cozinha. No entanto, todos os casos possuíam fator de ventilação de 45%.

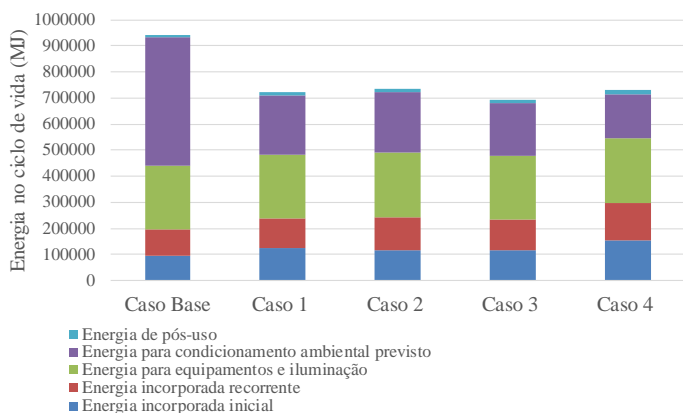
A seguir são mostrados, de forma comparativa, os resultados para o caso base e os quatro casos avaliados. São apresentadas no ciclo de vida da edificação as parcelas correspondentes à energia incorporada inicial (fase pré-uso), à energia incorporada recorrente ou de manutenção, à energia operacional para equipamentos e iluminação, à energia para condicionamento ambiental previsto e à energia para a fase de pós-uso ou desconstrução. Os resultados são exibidos para os quatro indicadores avaliados nos três cenários climáticos: atual, 2020 e 2050.

A Figura 116 exibe os resultados para o indicador de consumo energético, identificando o caso e o cenário climático. Os resultados da Figura 116a referem-se ao cenário climático atual e a Figura 116b ao cenário de 2050.

Figura 116 – Resultados para o indicador de consumo energético no ciclo de vida para os casos em São Paulo.



a) Cenário climático atual



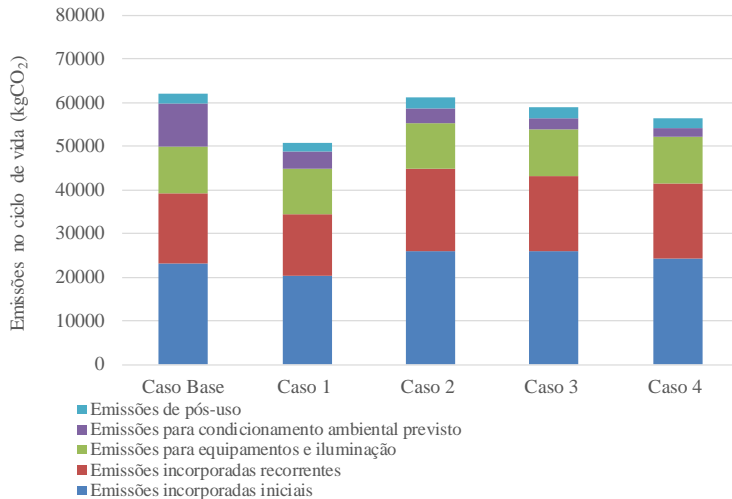
b) Cenário climático 2050

Nos três cenários climáticos o caso base apresentou o maior consumo energético considerando a energia primária nos 50 anos da vida útil da edificação. O caso 3 mostrou o menor consumo energético no ciclo de vida, com 550,45 GJ no cenário climático atual. O caso 1 com 588,12 GJ, teve consumo um pouco maior do que o caso 2 no cenário climático atual, enquanto para o cenário de 2050 o caso 2 com 733,83 GJ mostrou um consumo maior do que o caso 1 com 724,12 GJ. O caso 4 exibiu o maior consumo energético entre os casos com medidas de adaptação, sendo de 605,33 GJ no cenário climático atual; contudo, inferior ao caso

base. No cenário de 2050 o caso 4 representou redução de 22,5% em relação ao caso base. Para os casos 1 a 4, a parcela de equipamentos e iluminação manteve-se como a maior parcela em todos os cenários climáticos. Em contraposição a isso, para o caso base, somente no cenário climático atual a parcela correspondente ao consumo de equipamentos e iluminação foi a maior, sendo superada amplamente nos cenários de 2020 e 2050. Com relação à energia incorporada inicial, o caso base demonstrou o menor consumo, em grande parte por causa da menor quantidade de materiais. Por outro lado, o caso 4 mostrou a maior energia incorporada inicial e recorrente, em grande parte por causa da especificação das paredes de concreto com isolante. Para 2050, a diferença entre o caso base e o caso 3 com melhor desempenho significou redução em torno de 26,4% comparado ao caso base.

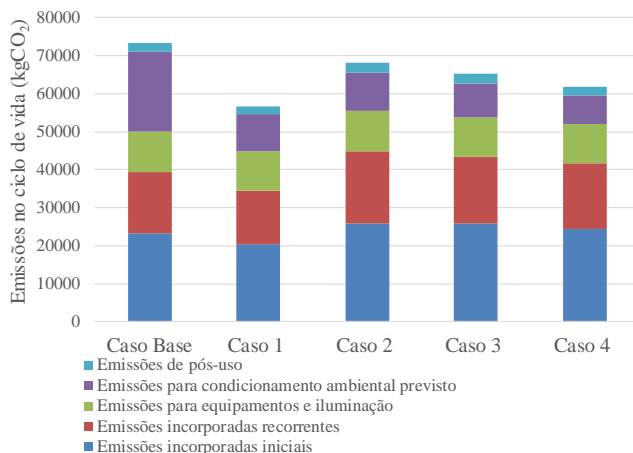
A Figura 117 mostra os resultados para o indicador de emissões de CO₂. Os resultados da Figura 117a exibem o cenário atual. Na Figura 117b são apresentados os resultados relativos a todos os casos avaliados no cenário de 2050.

Figura 117 – Resultados para o indicador de emissões de CO₂ no ciclo de vida para os casos em São Paulo



a) Cenário climático atual

Figura 117 (continuação)

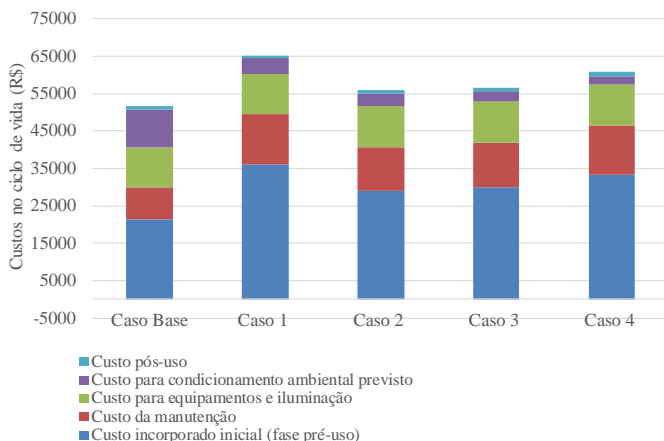


b) Cenário climático 2050

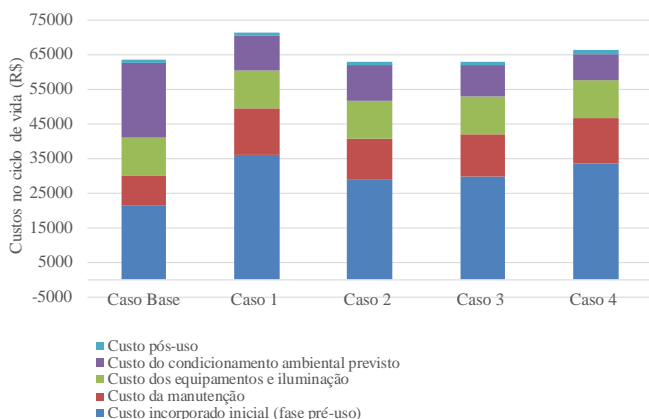
Para o indicador de emissões de CO₂ no ciclo de vida, o *ranking* dos casos foi diferente do indicador de consumo energético; contudo, o caso base continuou com o pior desempenho nos três cenários climáticos. Porém, a diferença entre o caso base e o caso 2, que mostrou as maiores emissões no ciclo de vida entre os casos analisados, foi menor do que a observada na análise anterior, em especial no cenário climático atual (de 1,11%). Notou-se também variação nas emissões incorporadas iniciais e recorrentes, em que o caso 2 exibiu as maiores parcelas, superando o caso base. O caso 2 possui um sistema construtivo de parede e cobertura muito similar ao caso base, mas com menor transmitância térmica da parede, porém possui forro em laje em concreto com EPS. O caso 1 mostrou a menor emissão incorporada inicial e recorrente, em grande parte por causa das paredes de madeira especificadas como sendo de madeira plantada, que possuem baixa emissão de CO₂. O caso 3 também apresentou alta emissão incorporada inicial, pelo uso da parede em tijolo duplo; contudo, na manutenção a parcela foi menor do que a do caso 2. As emissões por conta do uso previsto de condicionamento ambiental foram menores nos casos 3 e 4. No cenário climático de 2050, as emissões totais no ciclo de vida para o caso 1 foram de 56,76 tCO₂. Isso significou uma redução de 22,6% com relação ao caso base nesse cenário.

A Figura 118 mostra os resultados para o indicador de custos no ciclo de vida dos cinco casos em São Paulo nos cenários climáticos atual e 2050.

Figura 118 – Resultados para o indicador custo no ciclo de vida para os casos em São Paulo



a) Cenário climático atual



b) Cenário climático 2050

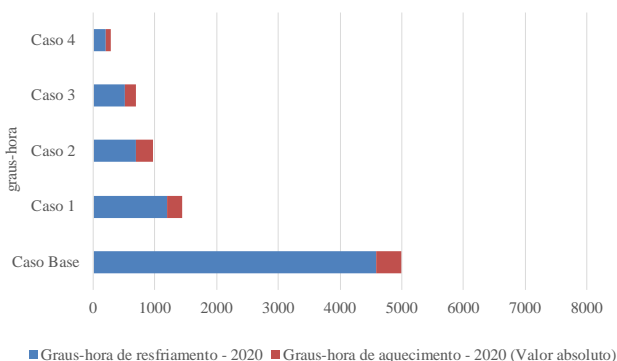
O indicador de custo no ciclo de vida foi o único no qual o desempenho do caso base na cidade de São Paulo superou os casos analisados em algum cenário climático. O caso base apresentou-se como a opção com menor custo no ciclo de vida nos cenários climáticos atual e de 2020. Entretanto, dois casos tiveram menor custo no ciclo de vida do que o caso base no cenário climático de 2050. O custo total do caso base nesse cenário foi de R\$ 63.288,39, enquanto o custo do caso 2 foi de R\$ 62.807,26 e, o caso 3 foi de R\$ 62.719,10. Para os casos 1 a 4, a maior

parcela do custo esteve no custo inicial dos materiais em todos os cenários climáticos. Como serviço, destacou-se em todos com maior proporção o custo da cobertura, seguido da alvenaria e esquadrias; e, como material, enfatizou-se o custo das esquadrias. No caso 4 as esquadrias como serviço tiveram destaque maior do que a alvenaria. Os casos 1 e 4 mostraram o maior custo, em grande parte, por causa das esquadrias, sendo todas com sombreamento nos quartos, e o caso 1 e 4 também com veneziana na sala de estar/cozinha. E ainda, as janelas do caso 4 ainda com maior dimensão. Igualmente o maior custo na fase de pré-uso nos casos 1 e 4 deve-se ao isolante especificado em ambas as paredes. No cenário de 2050, o maior valor foi do caso 1 com R\$ 71.166,79. No caso 1 os maiores valores por material corresponderam às esquadrias e às paredes de madeira (que incluíram a sua estrutura).

O caso base mostrou o maior consumo operacional com relação aos casos estudados, sendo mais significativo nos cenários climáticos de 2020 e, em especial, no de 2050. Da mesma forma, o custo para manutenção do caso base representou uma parcela menor do que o custo para manutenção nos casos 1 a 4.

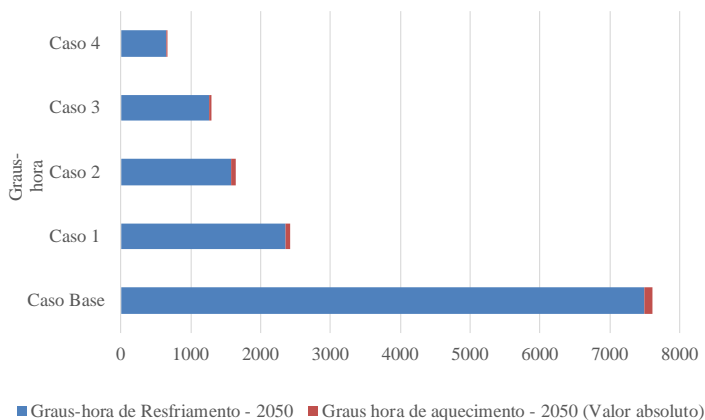
Na Figura 119 apresentam-se os resultados para o indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento do caso base e os quatro casos avaliados para os cenários climáticos futuros de 2020 e 2050. Os graus-hora para aquecimento são exibidos em valor absoluto, juntamente com os graus-hora de resfriamento. Vale lembrar que os graus-hora representam a média para a habitação, resultado da ponderação pela área dos ambientes.

Figura 119 – Resultados do indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento para os casos em São Paulo



a) Cenário climático 2020

Figura 119 (continuação)



b) Cenário climático 2050

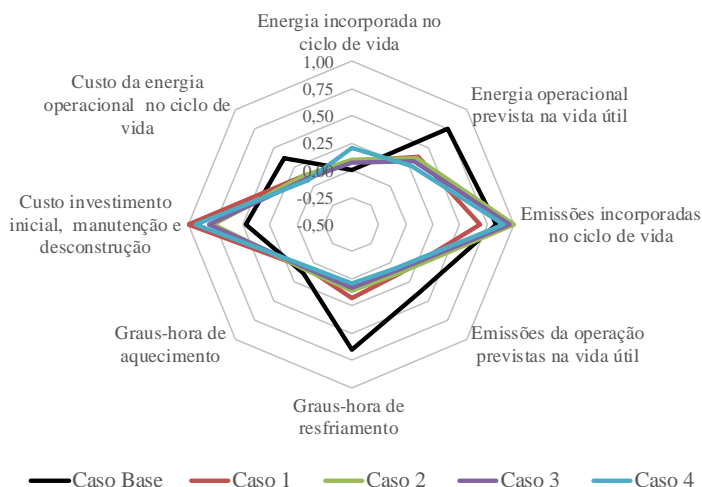
Resultados mais detalhados da avaliação realizada para o caso base com relação ao indicador de graus-hora de resfriamento e aquecimento foram mostrados no capítulo anterior desta pesquisa. Considerando-se a soma total de graus-hora de resfriamento e aquecimento, os casos 3 e 4 mostraram o melhor desempenho em todos os cenários climáticos para a cidade de São Paulo. Todos os casos avaliados exibiram desempenho muito superior ao caso base, em especial, por causa da redução dos graus-hora de resfriamento. A diferença entre os melhores casos e o caso base tendeu a aumentar nos cenários climáticos futuros. Considerando todos os cenários climáticos, a diferença de graus-hora entre o caso base e todos os casos avaliados representou reduções médias em torno de 76%. O caso 4 mostrou potencial para atingir o melhor desempenho neste indicador. Contudo, vale ressaltar os resultados de Sorgato (2015) colocados na revisão de literatura, onde para edificações de alto desempenho, com transmitância térmica baixa e capacidade térmica média, o controle da ventilação natural e dispositivos de sombreamento por parte do usuário são fundamentais para o bom desempenho térmico e energético da edificação. Faz-se a ressalva que esse conceito aplica-se para o caso 4 em São Paulo, onde se tem uma envoltória com isolamento nas paredes, além da cobertura, capacidade térmica média a alta dos componentes e um comportamento de usuário adequado estabelecido nos parâmetros da simulação. Dessa forma, outros comportamentos de usuário poderiam levar a resultados diferentes nesse indicador, em especial no caso 4.

Finalmente, são apresentados para a cidade de São Paulo os resultados do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto para os cinco casos avaliados de forma conjunta.

7.2.1.6 Resultados do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético para a cidade de São Paulo

Os resultados aqui apresentados consideram os quatro indicadores avaliados para os cinco casos na cidade de São Paulo. São exibidos os valores para os indicadores normalizados, incluindo todos os cenários de mudanças climáticas, conforme descrito na metodologia deste capítulo. A Figura 120 mostra o desempenho dos cinco casos avaliados em São Paulo, com os indicadores intermediários. Os valores mostrados no gráfico incluem resultados dos três cenários climáticos (atual, 2020 e 2050) e consideram a habitação com as duas formas de operação, tanto ventilação natural quanto no uso de AVAC e ventilação natural.

Figura 120 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético com indicadores intermediários⁴¹ para os cinco casos avaliados na cidade de São Paulo.

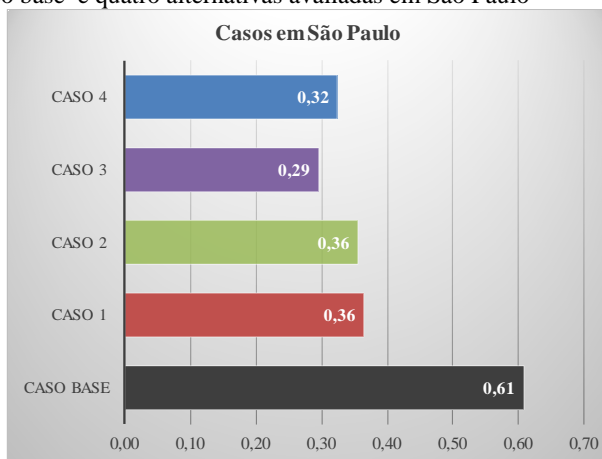


⁴¹ Energia e emissões incorporadas no ciclo de vida incluem a fase de pré-uso, etapa de manutenção na fase de uso e fase de pós-uso.

Pode ser observado que o caso base apresentou o pior desempenho no ciclo de vida com relação ao consumo energético previsto na operação, às emissões previstas na operação, aos graus-hora de resfriamento e aquecimento e ao custo operacional no ciclo de vida, ou seja, nos indicadores da fase de uso da operação. Por outro lado, alcançou o melhor desempenho nos critérios de energia incorporada no ciclo de vida e custo, considerando o investimento inicial, manutenção e desconstrução. O caso 1 teve o melhor desempenho com relação às emissões incorporadas, enquanto o desempenho mais baixo com relação aos custos não operacionais. Os casos 2 e 3 tiveram comportamento semelhante na maioria dos indicadores intermediários. O caso 4, por sua parte, mostrou a maior energia incorporada no ciclo de vida. Na Figura 120 percebe-se que o caso base exibiu a maior área ante os casos analisados; contudo, é difícil visualizar o desempenho final conjunto considerando todos os indicadores, para as opções apresentadas.

Para tanto, a Figura 121 mostra o Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto para todos os casos analisados na cidade de São Paulo, de forma numérica. Os índices variaram de 0,61 a 0,29. O índice 0,61 corresponde ao caso base, que demonstrou, portanto, o desempenho mais baixo em relação aos casos analisados.

Figura 121 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético numérico, para o caso base e quatro alternativas avaliadas em São Paulo

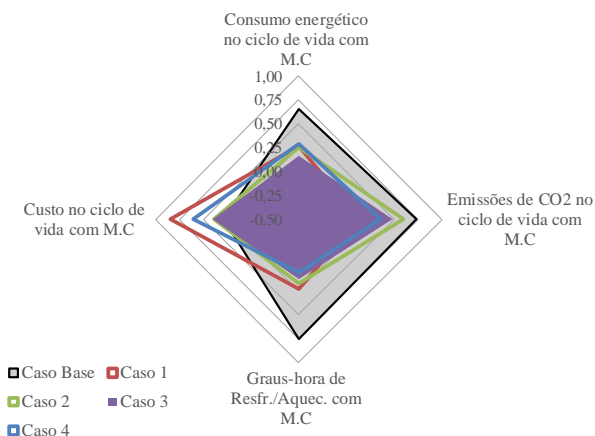


Considerando o Índice proposto, os casos 1 a 4 com medidas de adaptação representaram reduções no Índice em torno de 41 a 52% em

relação ao caso base. Igualmente, é visível perceber dois grupos com desempenhos similares. Os casos 1 e 2 apresentaram desempenho similar, ao mesmo tempo que os casos 3 e 4 mostraram desempenho análogo. Considerando os quatro indicadores finais avaliados no ciclo de vida, o caso 3 exibiu o melhor desempenho. O caso 3 para São Paulo considerou a habitação com orientação mais adequada (azimute 0°) onde os quartos estão voltados para as fachadas norte e leste. As paredes com capacidade térmica média de 174 kJ/m²K e transmitância térmica de 1,24 W/m²K em alvenaria dupla de tijolo de seis furos e câmara de ar entre as camadas do tijolo com reboco interno e externo, sendo a largura total da parede de 25 cm. A absortância solar das paredes externas foi de 0,3. A cobertura apresentou telha metálica com absortância solar 0,3, com isolante em lã de rocha de 5cm e forro em madeira. O sombreamento das esquadrias esteve presente somente nas janelas dos quartos, enquanto as dimensões das janelas mantiveram-se iguais às do caso base, assim como o fator de ventilação, sendo de 45%.

O índice numérico mostrou a posição de desempenho entre os diferentes casos de forma geral, porém não é possível visualizar o desempenho específico em cada indicador final. Para isso, é mais adequado o índice gráfico apresentado na Figura 122.

Figura 122 – Índice de Sustentabilidade do Ciclo de Vida Energético gráfico com indicadores finais para o caso base e as quatro alternativas avaliadas em São Paulo considerando mudanças climáticas.

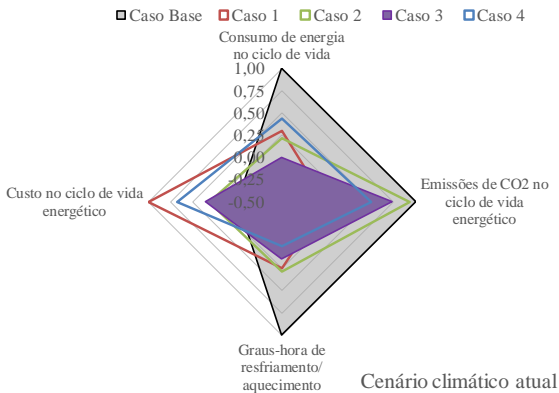


Nota: M.C = Mudanças climáticas

No índice gráfico de todos os casos avaliados é observado o desempenho de cada caso com relação aos indicadores finais. Nota-se, de forma mais clara do que na Figura 120, que o caso base foi responsável pela maior área no gráfico (área sombreada na cor cinza). Destaca-se com sombra na cor roxo, o caso 3 que obteve o melhor desempenho. Igualmente, é possível visualizar que o caso base apresentou o maior número, ou seja, o pior desempenho nos indicadores finais de consumo energético e emissões de CO₂ no ciclo de vida e, graus-hora de resfriamento e aquecimento. Entretanto, no indicador de custos no ciclo de vida considerando mudanças climáticas, mostrou o número mais baixo, ou seja, o melhor desempenho nesse quesito com relação aos outros casos analisados. Contudo, mostra uma diferença pequena nesse indicador com relação aos casos 2 e 3. Considerando o indicador apresentado acima, que integra os resultados para os três cenários climáticos, é possível verificar que em São Paulo nenhum dos casos 1 a 4, exibiram desempenho superior em todos os indicadores de forma simultânea, com relação ao caso base. Contudo o Índice proposto mostrou melhoria muito significativa das alternativas analisadas com relação ao caso base, sob a ótica da análise de uma abordagem integrada.

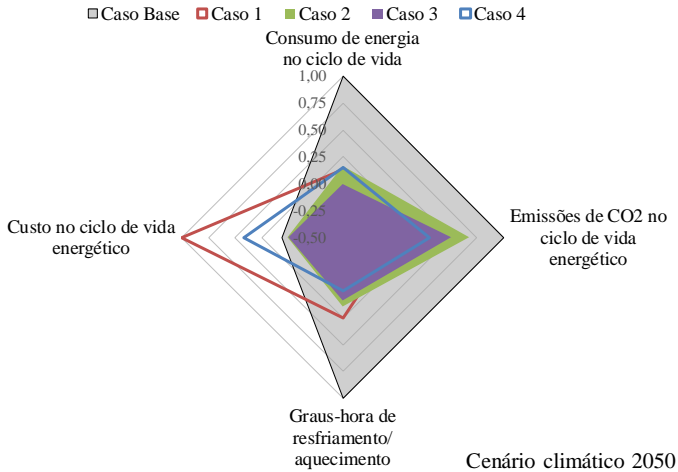
Por outro lado, considerando a mesma metodologia, porém separando os resultados do Índice proposto por cenário climático, têm-se resultados diferentes. A Figura 123 mostra os resultados para os cenários climáticos atual e de 2050. Ressaltam-se com sombreadamento o caso base, caso 3 e o caso 2 no cenário de 2050.

Figura 123 - Índice de sustentabilidade do ciclo de vida energético gráfico para os casos em São Paulo avaliado por cenário climático.



a) Cenário climático atual

Figura 123 (continuação)



b) Cenário climático 2050

A análise por cenário climático mostrou que considerando o cenário climático de 2050, dois dos quatro casos avaliados (casos 2 e 3) mostram desempenho melhor do que o caso base em todos os indicadores finais. Dessa forma, considerando somente um contexto de cenário futuro, as medidas com adaptação propostas no caso base teriam redução, ou seja um impacto positivo em todos os indicadores finais avaliados.

Análises posteriores realizadas com mudança em parâmetros relacionados ao custo da energia, mostraram que um aumento do 25% na tarifa da energia mostra dois dos casos avaliados, com melhor desempenho em todos os indicadores quando comparados ao caso base, já no cenário de 2020. Enquanto seria três casos no cenário de 2050. O mesmo ocorreria caso os valores da inflação e a taxa de desconto fossem valores mais semelhantes entre eles.

A avaliação mostrou a necessidade tanto da análise numérica quanto gráfica para entender o desempenho global e comparativo dos casos analisados. A avaliação realizada mostrou como, ao considerar-se o ciclo de vida da edificação, mudanças climáticas e uma abordagem integrada com relação ao desempenho termoenergético das edificações de baixa renda, é justificável a introdução de melhorias nos projetos. Contudo, se observado somente pela ótica de custo atual, mesmo que considerando o ciclo de vida da edificação, a introdução de todas as medidas aqui apresentadas para eficiência energética em projetos de HIS

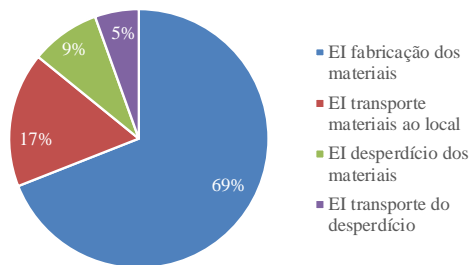
na cidade de São Paulo torna-se mais limitada, ficando justificável nesse indicador para a metade dos casos no cenário de 2050. A avaliação demonstrou também a importância de serem levados em conta cenários climáticos futuros na análise em conjunto de indicadores relacionados à sustentabilidade e ao desempenho termoenergético da edificação no ciclo de vida, pois o desempenho das medidas aplicadas pode mudar quando analisado sob diferentes óticas.

7.2.2 Resultados para todos os casos analisados na cidade de Salvador

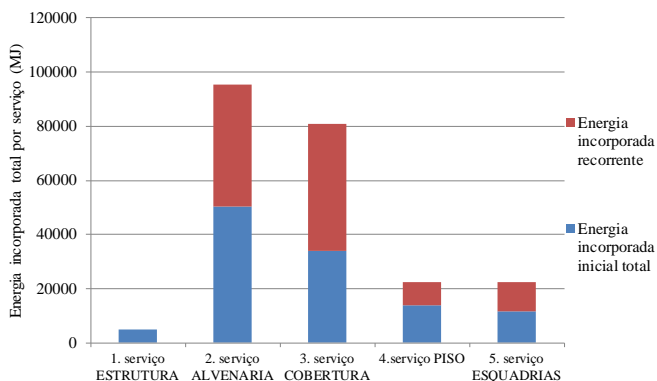
Para Salvador, os resultados são apresentados de forma conjunta para o caso base e os quatro casos com medidas de adaptação, mostrando-se algumas particularidades para o caso base. Os quatro casos avaliados para Salvador exibiram dois tipos de paredes: dupla de madeira com isolante e alvenaria de tijolo com espessura maior do que o caso base, (contudo, menor do que a parede de alvenaria nos casos avaliados em São Paulo). As coberturas avaliadas foram as mesmas que nos casos de São Paulo, metálica com absorvância solar 0,3 e telha de barro clara com absorvância solar 0,5, ambas com camada de isolante em lã de rocha de 5cm. Do forro foram avaliados os três tipos, PVC, madeira e laje mista com EPS. E, as esquadrias tiveram maior variação do que nos casos de São Paulo. A dimensão de todas as janelas foi maior do que o caso base em 20 cm na altura, sendo de 2,30 m. E, no peitoril, a altura das janelas da sala de estar e da cozinha foi menor do que no caso base em 30 cm, ficando o peitoril, em 0,80m. Três dos casos possuíam janelas com venezianas para sombreamento, tanto nos quartos quanto na sala de estar e na cozinha; sendo somente nos quartos, no caso 2. Com relação ao fator de ventilação os casos apresentaram variação, sendo a maioria com 0,90 e somente um deles com 0,45. Dados mais específicos para cada caso em Salvador encontram-se nos **Apêndices H.9 e H.11**.

Os resultados são apresentados para cada um dos indicadores avaliados. Os resultados para o indicador de consumo energético para o caso base na fase de pré-uso são mostrados na Figura 124. Na Figura 124a verificam-se as parcelas de energia incorporada correspondentes à fabricação dos materiais, ao transporte inicial dos materiais ao local, ao desperdício e ao transporte do desperdício. A Figura 124b exibe a energia incorporada total por serviço para o caso base levando em conta a energia incorporada inicial e a recorrente com manutenção.

Figura 124 – Composição do consumo energético para o caso base na cidade de Salvador.



(a) Fase de pré-uso



(b) Energia incorporada total por serviço

Nota: EI = energia incorporada

Há diferença na composição em relação ao caso base na cidade de São Paulo, pois a parcela correspondente ao transporte total dos materiais na fase de pré-uso equivaleu à 22% do consumo energético, ou seja praticamente um quarto dessa fase. Por outro lado, e similarmente ao caso base em São Paulo, a energia incorporada total por serviço apresentou a mesma distribuição. O serviço de alvenaria foi o que mostrou maior energia incorporada total no ciclo de vida, considerando a energia incorporada inicial e a recorrente, sendo a segunda posição ocupada pela cobertura. Contudo, os valores absolutos de energia incorporada total por serviço, foram maiores em Salvador do que em São Paulo. Os resultados da análise energética exibiram diferenças para as cidades de São Paulo e Salvador. A Tabela 55 mostra resultados da análise energética para o caso base de Salvador comparando com os resultados obtidos em São Paulo.

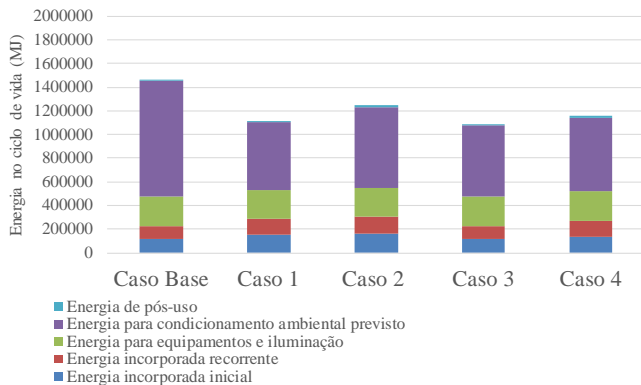
Tabela 55 – Comparação entre os resultados de consumo energético no ciclo de vida para os casos base de São Paulo e Salvador no cenário climático atual

	Pré-uso GJ/m ² (%)	Uso GJ/m ² (%)	Pós-uso GJ/m ² (%)	Total GJ/m ²	Energia incorporada total (inicial + recor.)	Energia operac. (AVAC + equip. + ilum.)
Caso base São Paulo	2,37 (13,9%)	14,44 (84,7%)	0,23 (1,4%)	17,05 (100%)	4,91 (28,8%)	11,89 (69,7%)
Caso base Salvador	2,88 (7,81%)	33,72 (91,4%)	0,28 (0,8%)	36,8 (100%)	5,69 (15,43%)	30,9 (83,78%)

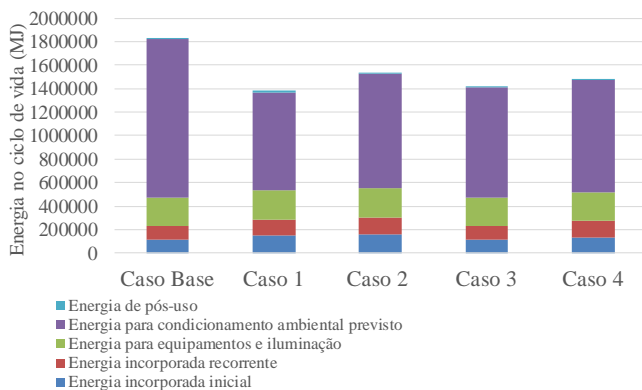
A energia incorporada inicial na fase de pré-uso para o caso base de São Paulo foi de 94,2 GJ ou 2,37 GJ por m², enquanto para o caso base em Salvador foi de 114,5 GJ ou 2,88 GJ/m². A diferença entre os valores se deve principalmente à parcela correspondente ao transporte no caso de Salvador, assim como ao aumento nas dimensões das esquadrias nessa cidade. Por outro lado, o consumo energético operacional considerando o ciclo de vida, foi para o caso base em São Paulo de 472,9 GJ ou 11,89 GJ/m² no cenário climático atual podendo chegar a 736,37 GJ ou 18,52 GJ/m² no cenário de 2050. Já esses valores para o caso base de Salvador foram de 1.228,29 GJ ou 30,9 GJ/m² no cenário atual podendo chegar à 1.593,94 GJ ou 40,1 GJ/m². Dessa forma, comparativamente, o caso base em Salvador mostrou um consumo energético no ciclo de vida superior - mais do que duas vezes - ao caso base em São Paulo. Isso explica-se por conta do aumento na parcela de consumo de energia operacional previsto.

A Figura 125 exhibe os resultados no consumo energético no ciclo de vida para o caso base e os casos analisados na cidade de Salvador nos cenários climáticos atual (Figura 125a) e 2050 (Figura 125b). Nos resultados no ciclo de vida da edificação é mostrada a parcela correspondente à energia incorporada inicial, à energia incorporada recorrente ou de manutenção, à energia operacional para equipamentos e iluminação, à energia para condicionamento ambiental previsto e à energia para a fase de pós-uso.

Figura 125 – Resultados para o indicador de consumo de energia no ciclo de vida para todos os casos em Salvador



a) Cenário climático atual



b) Cenário climático 2050

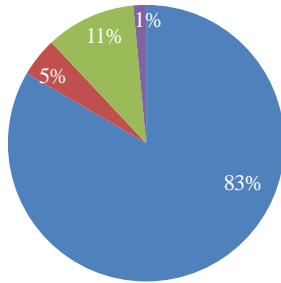
Para todos os cenários climáticos, o caso base foi o que apresentou o maior consumo energético no ciclo de vida. Por outro lado, o caso 3 mostrou o menor consumo energético para o cenário climático atual, enquanto, o caso 1, ocupou esta posição no cenário climático de 2050. Para todos os casos, a maior parcela correspondeu ao consumo energético para condicionamento ambiental previsto. A redução entre o caso base e o melhor caso ficou em torno de 25%, considerando todos os cenários climáticos.

Para a avaliação do indicador de emissões de CO₂, são mostrados, inicialmente os resultados do caso base na fase de pré-uso. A Figura 126a exibe as emissões na fase de pré-uso para o caso base na cidade de

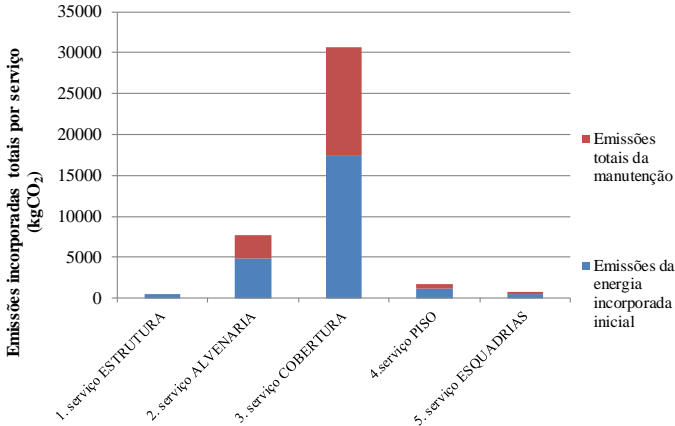
Salvador; e a Figura 126b as emissões incorporadas por serviço, considerando a energia incorporada a e a recorrente para manutenção no ciclo de vida da edificação.

Figura 126 – Emissões de CO₂ no ciclo de vida para o caso base na cidade de Salvador

- Emissões na fabricação dos materiais
- Emissões do transporte dos materiais até o local
- Emissões do desperdício dos materiais
- Emissões do transporte dos materiais de desperdício



(a) Fase de pré-uso



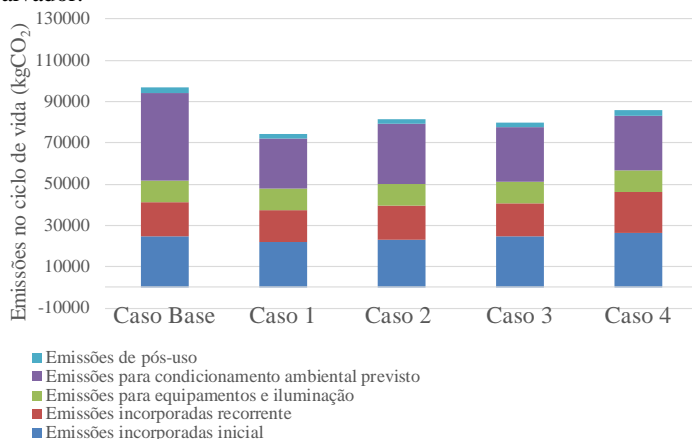
(b) Emissões incorporadas por serviço (inicial e recorrente)

Para o caso base na cidade de Salvador, a maior parcela de emissões foi decorrente da fabricação dos materiais. O transporte total dos materiais, incluindo o transporte inicial e o do desperdício correspondeu a 6% na fase de pré-uso. Por outro lado, a maior emissão encontrou-se no serviço da cobertura, principalmente por causa da alta emissão da estrutura de madeira especificada como de madeira nativa. E

o serviço da alvenaria apresentou a maior emissão quando comparado com os serviços do piso e de esquadrias.

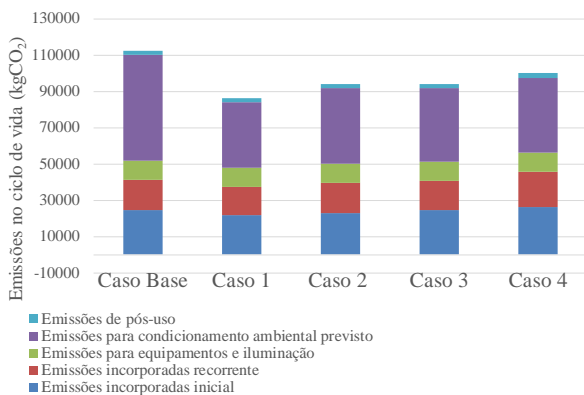
A Figura 127 mostra resultados com relação ao indicador de emissões de CO₂ para o caso base e as quatro alternativas analisadas em Salvador, considerando os cenários climáticos atual e 2050. É exibida a parcela correspondente às emissões incorporadas inicial e recorrente, às emissões na operação para equipamentos e iluminação, às emissões por conta do condicionamento ambiental previsto e às emissões para a fase de pós-uso. Os resultados mostraram novamente o caso base como tendo a maior emissão no ciclo de vida; portanto, o desempenho mais baixo entre os casos analisados em todos os cenários climáticos, para esse indicador. O caso 1 exibiu o melhor desempenho em todos os cenários com relação a esse indicador, por causa da parcela incorporada; e, especialmente, a operacional menor do que a dos outros casos analisados. A maior parcela de emissões em todos os casos deu-se por causa do condicionamento ambiental previsto, com exceção do caso 1, em que essa parcela foi muito similar à parcela incorporada inicial para o cenário climático atual.

Figura 127 – Resultados da avaliação ambiental no ciclo de vida para os casos em Salvador.



a) Cenário climático atual

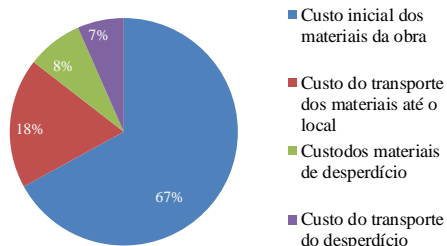
Figura 127 (continuação)



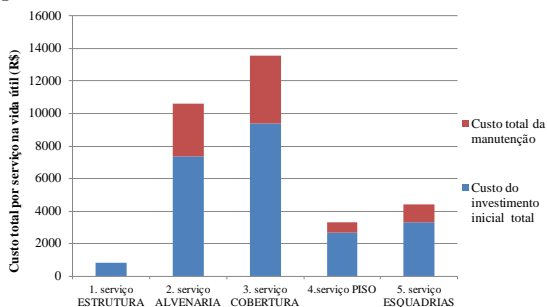
b) Cenário climático 2050

A avaliação do indicador de custos no ciclo de vida para a fase de pré-uso do caso base em Salvador é mostrada na Figura 128 com os custos por etapa e por serviço, respectivamente.

Figura 128 – Custos por etapas no caso base em Salvador



(a) Fase de pré-uso

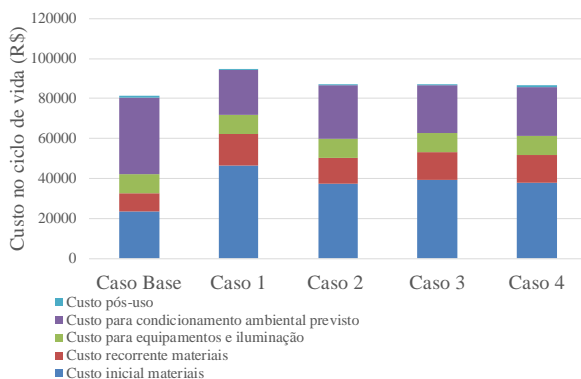


(b) Custo incorporado inicial e total por serviço

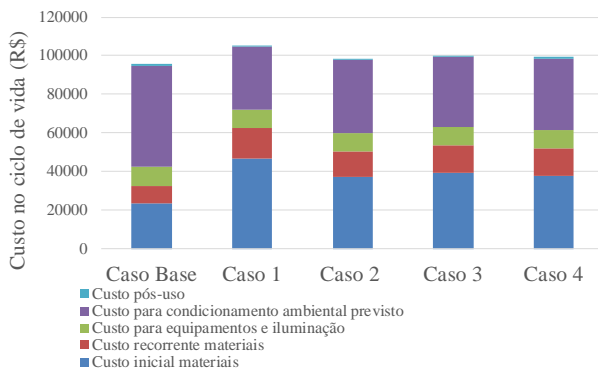
No caso base em Salvador, a parcela de custo inicial dos materiais correspondeu ao maior custo na fase de pré-uso com 67%, seguida da parcela correspondente ao transporte, com 25% no total. Com relação ao custo incorporado no ciclo de vida por serviços tem destaque tanto o custo dos componentes da cobertura quanto o da alvenaria, sendo a maior parcela nos dois, a do custo de investimento inicial.

Na Figura 129 apresentam-se os resultados para o indicador de custo no ciclo de vida dos cinco casos em Salvador. Os resultados “a” e “b” mostram os cenários climáticos atual e 2050, respectivamente.

Figura 129 – Resultados do indicador de custo no ciclo de vida para os casos em Salvador



a) Cenário climático atual



b) Cenário climático 2050

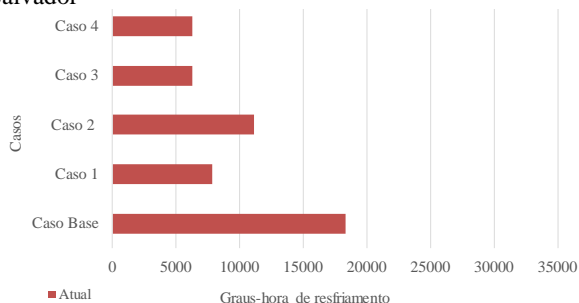
Diferentemente da situação em São Paulo, na cidade de Salvador o caso base mostrou um custo menor no ciclo de vida da edificação em

todos os cenários climáticos. No entanto, a diferença percentual com os melhores casos observados foi menor do que em São Paulo. O melhor caso no cenário climático atual (caso 4), representou um aumento de 6,5%, enquanto o caso com maior valor nesse mesmo cenário (caso 1), representou um aumento de 16,8%. Para o cenário de 2050, o melhor caso neste indicador é o caso 2 que representa um aumento de custo no ciclo de vida de 3%. O pior caso no cenário de 2050 para o indicador de custo é novamente o caso 1. No entanto nesse cenário climático representa um aumento de 10% no custo no ciclo de vida. No cenário climático de 2050 a diferença do custo no ciclo de vida entre o caso base e os casos 2, 3 e 4 ficou em torno de 3% e 4%. Nos casos 1, 3 e 4 o maior peso por serviço nesse indicador econômico foi nas esquadrias, especialmente, por conta de terem um fator de ventilação de 90%⁴². Por outro lado, no caso 2 o maior peso por serviço no indicador econômico foi nas paredes, e, como material, no alumínio, na madeira para as paredes e, no isolante. Conforme colocado, o aumento observado no ciclo de vida dos casos 1, 2, 3 e 4 quando comparados ao caso base variou entre 3% e 16% dependendo do cenário climático, sendo os maiores valores observados no cenário climático atual. Considerou-se portanto, o incremento baixo com relação ao caso base, para este indicador. Nos casos 1 a 4 a parcela correspondente a custo inicial dos materiais foi maior para todos os cenários climáticos, com exceção do caso 2, no cenário de 2050, onde a maior parcela foi por conta do condicionamento ambiental previsto. Algumas análises realizadas mostraram a importância do peso do transporte no custo final, onde distâncias longas aumentam significativamente o custo do material.

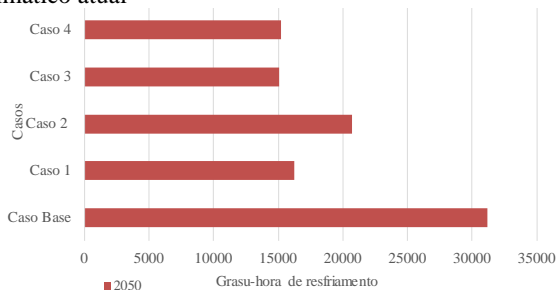
Na Figura 130 são exibidos os resultados para o indicador de graus-hora de resfriamento para todos os casos e cenários climáticos atual e 2050 em Salvador.

⁴² O casos com maior peso nas esquadrias foi por conta de terem sido especificadas com fator de ventilação de 90% e venezianas em todos os ambientes. Esse tipo de esquadria não foi encontrado no material alumínio. Portanto, o seu custo foi considerado com base em valores encontrados nas esquadrias de PVC, que têm este tipo de esquadria. Assim, foi determinado, como tendo um custo superior em 30%, quando comparado a esquadrias em alumínio com veneziana e fator de ventilação de 45%.

Figura 130 – Resultados do indicador de graus-hora para todos os casos na cidade de Salvador



Cenário climático atual



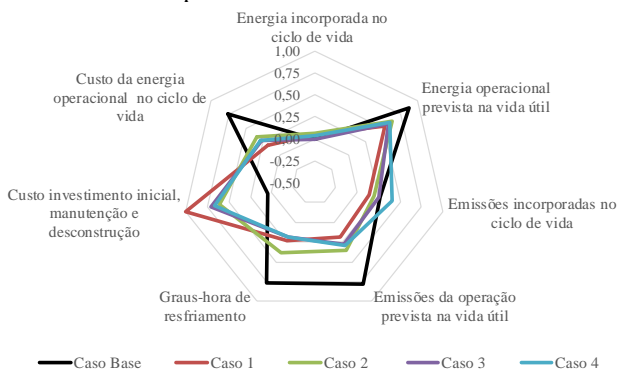
Cenário climático 2050

Os resultados apresentaram novamente o caso base com o desempenho mais baixo em todos os cenários climáticos. A redução do caso base para os casos 3 e 4 que mostraram o melhor desempenho nesse indicador foi em torno de 65% dos graus-hora de resfriamento para o cenário atual e de 51% para 2050. Por fim, são apresentados para a cidade de Salvador os resultados do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto para os casos avaliados de forma comparativa.

7.2.2.1 Resultados do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético para Salvador

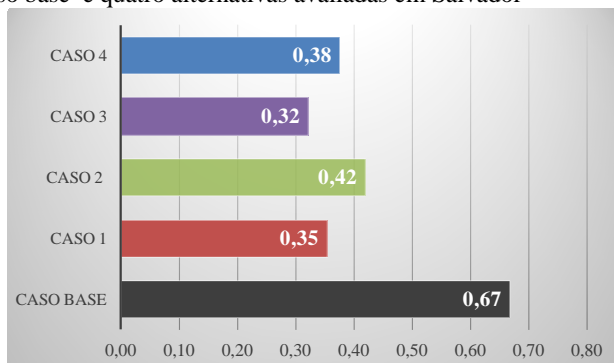
Os resultados mostrados consideraram os cinco casos avaliados em Salvador com os valores nos indicadores normalizados, todos os cenários de mudanças climáticas e as duas formas de operação da edificação. Os resultados exibem as avaliações dos quatro indicadores de maneira conjunta. A Figura 131 mostra o desempenho dos indicadores intermediários.

Figura 131 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético com indicadores intermediários para os cinco casos avaliados na cidade de Salvador



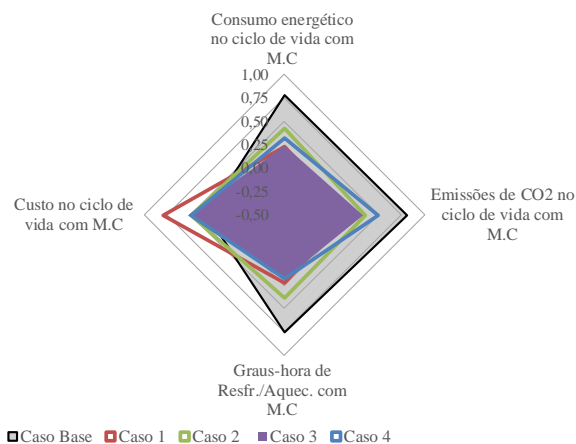
Para Salvador o caso base apresentou o menor valor nos indicadores intermediários de custo do investimento inicial, manutenção e desconstrução. O caso 1 teve o menor valor, ou seja melhor desempenho na energia operacional, emissões incorporadas, emissões da etapa de operação e, custo operacional no ciclo de vida. Os casos 2, 3 e 4 tiveram comportamento similar na maioria dos indicadores. O caso 1 teve o pior desempenho no indicador de custo não operacional. E o caso 4 mostrou emissões incorporadas maiores do que o caso base. A Figura 132 exibe o Índice numérico para os casos analisados em Salvador. Os índices variaram de 0,67 a 0,32. O caso base apresentou o maior índice, portanto, mostrando o pior desempenho em relação aos casos analisados.

Figura 132 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético numérico para o caso base e quatro alternativas avaliadas em Salvador



O caso com melhor desempenho na análise integrada foi o numero 3, cujo Índice foi de 0,32, representando uma redução em torno de 52% em relação ao caso base. Contudo, o caso 1 também ficou com um Índice muito próximo, de 0,35. Diferentemente de São Paulo os casos não mostraram comportamentos similares entre si. Considerando-se todos os casos com relação ao caso base, obtiveram-se reduções nos Índices entre 37% e 52%. Para uma melhor visualização do desempenho em relação aos indicadores finais exibe-se o Índice gráfico na Figura 133.

Figura 133 – Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético gráfico para todos os casos avaliados em Salvador



O caso 3 na cidade de Salvador corresponde à um caso que considerou, assim como os outros 3 casos avaliados, a orientação com azimute 0° com os quartos nas fachadas leste e norte; paredes com transmitância térmica de 2,24 W/(m².K) e capacidade térmica de 133 kJ/(m².K), em alvenaria de tijolo com 8 furos; absorvância das paredes externas em 0,3; cobertura com baixa absorvância solar (0,3) em telha metálica e isolamento com lã de rocha de 5cm e forro em PVC; sombreamento nas janelas de todos os ambientes de permanência prolongada, sala de estar, cozinha e quartos, por meio de venezianas; todas as janelas com fator de ventilação de 90% e com dimensões maiores do que as do caso base, tendo todas elas altura da verga da janela de 2,30 m, ou seja, 20 cm a mais na altura; e as janelas da sala de estar e da cozinha altura de peitoril de 80 cm. O outro caso que mostrou um Índice semelhante, é o caso 1, o qual têm os mesmos componentes do caso 3 para cobertura e esquadrias, no entanto, apresenta paredes com baixa

capacidade e transmitância térmica, em madeira dupla com estrutura em madeira e isolamento no meio das paredes em lã de rocha de 5cm; absorvância das paredes externas em 0,3; e forro em madeira.

Para Salvador um aumento do custo da energia em 30% deixaria três casos com desempenho superior ao caso base em todos os indicadores finais para os cenários de 2020 e 2050. Igualmente, caso a taxa de retorno e inflação tivessem valores similares.

Esses resultados contribuem para mostrar que frente aos indicadores avaliados obteve-se em Salvador um retorno adequado com a incorporação de medidas para adaptação de eficiência energética, considerando o ciclo de vida da edificação, mudanças climáticas e uma abordagem integrada relacionada ao desempenho termoenergético das edificações de baixa renda na tipologia unifamiliar térrea.

Para ambas as cidades, a incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos para adaptação às mudanças climáticas, apresentaram um limite menor para o indicador econômico, em especial para o cenário climático atual. Já para cenários climáticos futuros, em especial, o cenário de 2050, a metade do casos avaliados tornaram-se viáveis para a cidade de São Paulo. Contudo, as diferenças observadas no indicador de custos no ciclo de vida, foi relativamente baixa, em especial no cenários futuros, quando comparados os casos com medidas de adaptação com o caso base, para ambas as cidades. Igualmente, fica o questionamento se a condicionante econômica deve ter uma importância igual ao consumo de recursos energéticos do país, emissões de CO₂ e conforto do usuário, pois a limitação de recursos no planeta limita a própria existência humana. Dessa forma, considera-se que se tem um amplo potencial de melhoria nos projetos quando comparados ao caso base ou prática corrente atual. Igualmente foi mostrada a importância de avaliações com abordagens mais holísticas que mostrem os reais impactos e benefícios das escolhas que estão sendo realizadas para os projetos do setor de HIS, com relação ao desempenho termoenergético atual e futuro.

7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A última etapa da pesquisa previu a proposta de uma abordagem integrada e tomou como base os resultados das simulações termoenergéticas apresentados na Etapa 2. O caso base da casa unifamiliar foi comparado com quatro projetos escolhidos para análise entre aqueles que mostraram na Etapa 2 bom comportamento com relação às medidas de adaptação aplicadas na fase de uso e uma variedade de

materiais e componentes. As análises foram novamente realizadas para as cidades de São Paulo e Salvador. Com os resultados obtidos nesta etapa, podem ser listadas as considerações a seguir:

1. Mostraram-se diferenças significativas entre os resultados em São Paulo e Salvador, com relação aos pesos das diferentes etapas em cada fase nos indicadores propostos. Em números absolutos o caso base em Salvador apresentou impacto maior do que o caso base em São Paulo para todos os indicadores, em especial por conta do maior consumo com condicionamento ambiental previsto e maior peso na etapa de transporte dos materiais.
2. No caso base em São Paulo, o indicador de consumo energético mostrou o consumo com equipamentos e iluminação como a maior parcela no ciclo de vida no cenário climático atual; entretanto, nos cenários climáticos futuros esse lugar foi ocupado pelo consumo previsto com o condicionamento ambiental. Para os indicadores de emissões de CO₂ e custos no ciclo de vida, a parcela da fabricação inicial dos materiais foi equivalente ao consumo previsto para condicionamento ambiental no cenário climático de 2050.
3. Na avaliação de todos os casos para São Paulo, no indicador de consumo de energia no ciclo de vida, o caso base teve o maior consumo em todos os cenários climáticos. Com a introdução das medidas avaliadas, foram alcançadas reduções máximas em torno de 18% no cenário climático atual até 26% no cenário de 2050 para esse indicador. Nos casos com medidas aplicadas, a parcela correspondente ao consumo de equipamentos e iluminação tornou-se a maior em todos os cenários climáticos. No indicador de emissões de CO₂ no ciclo de vida, o caso base obteve o mais baixo desempenho, porém, o *ranking* de desempenho dos diferentes casos diferiu do indicador de consumo energético. No indicador de custos no ciclo de vida, o caso base mostrou-se a melhor opção frente aos casos avaliados, nos cenários climáticos atual e de 2020, tendo o menor custo. Dos casos com medidas de adaptação, dois deles mostraram um custo menor do que o caso base no cenário climático de 2050. Para todos os casos com medidas de adaptação, a maior parcela nesse indicador esteve na fase de pré-uso e, dentro dela, o custo inicial dos materiais. No indicador relacionado ao conforto do usuário os casos com medidas de adaptação mostraram ampla redução nos graus-hora de resfriamento em todos os cenários climáticos.

4. Para Salvador, a abordagem integrada mostrou que para o indicador de consumo de energia no ciclo de vida, e na fase de pré-uso, a parcela relacionada tanto à fabricação dos materiais quanto ao transporte foi muito importante. Esses resultados diferiram das análises em São Paulo, onde o transporte não representou uma parcela significativa.
5. Ao considerar-se a avaliação de todos os casos para Salvador, o caso base mostrou o maior valor no consumo energético no ciclo de vida em todos os cenários climáticos. E, diferentemente do caso base em São Paulo, a maior parcela para todos os cenários e todos os casos analisados, foi o consumo previsto com uso de AVAC. No indicador de emissões de CO₂, o caso base apresentou-se novamente com o mais baixo desempenho em todos os cenários climáticos. Contudo, observaram-se maiores diferenças na etapa operacional e; em menor grau, na parcela da manutenção para todos os casos. No indicador de custos no ciclo de vida, e levando em conta a fase de pré-uso, a fabricação dos materiais demonstrou-se como a parcela mais significativa, seguida do transporte. Por materiais, o custo maior para os casos em Salvador, que consideraram janelas com fator de ventilação de 0,90, encontrou-se nas esquadrias. O caso base em Salvador permaneceu com o menor valor no ciclo de vida para todos os cenários climáticos nesse indicador, contudo, a diferença com os casos com medidas aplicadas variou entre 6 e 16% para o cenário climático atual; 4 e 11% para 2020 e, 3 e 10% para 2050. No indicador relacionado ao conforto do usuário, a redução em grau-hora de resfriamento entre o caso base e as alternativas avaliadas mostrou reduções entre 33% e 65%, dependendo do caso e cenário climático avaliado, menor, do que o observado em São Paulo.
6. Para o Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto, os casos com medidas de adaptação em São Paulo representaram reduções entre 41% e 52% com relação ao Índice do caso base. Para Salvador essa redução variou entre 37 % e 52%. O índice proposto pode dar subsídio às decisões de projeto considerando uma abordagem integrada.

A pesquisa sugeriu, de forma prática uma abordagem mais holística que incorporasse o conceito do ciclo de vida, mudanças climáticas e uma abordagem integrada com foco no desempenho termoenergético dos projetos de habitação social que estão sendo construídos na atualidade.

8. CONCLUSÕES

A pesquisa propôs a avaliação da incorporação de medidas de eficiência energética em projetos de habitação de interesse social no Brasil por meio de uma abordagem integrada no ciclo de vida do edifício com adaptação às mudanças climáticas e foco no desempenho termoenergético do edifício. De forma a alcançar o objetivo geral, foram propostas três etapas na pesquisa.

A primeira parte da pesquisa buscou maior conhecimento da realidade do setor de HIS com a elaboração de projetos representativos das tipologias que estão sendo construídas na atualidade e, mais especificamente, no PMCMV. O conhecimento do *status quo* do setor de habitação de interesse social é muito importante, pois políticas públicas podem tomar como base esse conhecimento, igualmente outras pesquisas podem aproveitar os resultados dessas informações. Nessa etapa foram identificados dois grupos de níveis de renda, para os quais foram levantadas as principais características que afetam o seu desempenho termoenergético. Os projetos definidos como representativos incorporaram as características comuns encontradas em cada tipologia.

Para o nível de renda definido como 1, que corresponde à Faixa 1 no PMCMV, foram definidas três tipologias representativas: casa térrea unifamiliar, casa térrea geminada e edifício multifamiliar de quatro ou cinco andares com planta em formato H. Do nível de renda 2 que corresponde às Faixas 2 e 3 do PMCMV, foram definidas duas tipologias representativas: edifício linear de cinco andares e edifício com planta em formato H de quatro andares, este último com características diferenciadas do nível de renda 1. Os projetos representativos foram avaliados em função da Etiqueta de Energia para duas zonas bioclimáticas (ZB3 e ZB8) representadas pelas cidades de São Paulo e Salvador, respectivamente, consideradas representativas tanto do deficit habitacional quanto de climas extremos no país. Os projetos representativos também foram comparados com o atendimento aos requisitos mínimos para desempenho térmico conforme a NBR 15575. Os resultados mostraram que a prática corrente na habitação de interesse social mostrou tendência a um baixo desempenho termoenergético da edificação, em especial para o verão, pois a pior avaliação foi sempre observada nesse quesito. Isso indicou potenciais problemas por causa da importância do conforto térmico no verão para as pessoas e do potencial uso da introdução de condicionamento artificial nesse setor. Igualmente, corroborou a necessidade de introduzir a avaliação com relação às

mudanças climáticas nos projetos, considerando uma perspectiva em longo prazo. No nível de renda 1 foram observados os resultados com mais baixo desempenho, sendo isso muito relevante, pois esse é o setor em que se concentra o maior déficit habitacional. Isso pode sugerir financiamento insuficiente e a necessidade de padrões mais ambiciosos para o desempenho do setor, entre os quais poderia estar contemplada a Etiqueta de Energia nível A ou B.

Os resultados deixaram em destaque a necessidade de adaptação bioclimática dos projetos que estão sendo construídos. Por outro lado, entre as tipologias levantadas, foi constatado que a mais recorrente no setor é a tipologia de casa unifamiliar térrea, sendo a que comparativamente apresentou o mais baixo desempenho na avaliação com a Etiqueta de Energia, o que leva a questionamentos sobre o que se considera relevante na aprovação de projetos para o setor.

Na primeira etapa foram identificadas algumas questões relevantes que deveriam ser observadas nos projetos, tais como: melhoria nas questões de ventilação por meio de alterações nas esquadrias, absorvância solar nas paredes e nas coberturas, necessidade de redução da transmitância térmica em coberturas e paredes e necessidade de sombreamento, entre outras. O estudo mostrou que nos projetos típicos é urgente a necessidade de introdução de medidas de eficiência energética que possam levar também a mudanças em tipologias ou incentivá-las.

A segunda etapa da pesquisa realizou análise do comportamento da casa unifamiliar isolada frente às mudanças previstas no clima futuro. Considerando tanto o caso base quanto a incorporação de medidas de eficiência energética no projeto, de forma isolada e em conjunto. Essa etapa foi realizada com simulação termoenergética computacional considerando o clima nas cidades de São Paulo e Salvador. Embora todas as incertezas associadas aos cenários climáticos futuros, estes foram incluídos de forma a mostrar tendências nos diferentes períodos.

O caso base mostrou aumento significativo nos indicadores relacionados à necessidade de resfriamento e refrigeração nos três cenários climáticos considerados, tanto em São Paulo quanto em Salvador. Por outro lado, observou-se redução nos indicadores ligados ao aquecimento para a cidade de São Paulo, nos cenários climáticos futuros. As medidas de adaptação foram avaliadas em função de indicadores anuais na operação: consumo energético; emissões de CO₂ e indicadores relacionados ao conforto do usuário. As medidas de adaptação analisadas apresentaram grande potencial para melhoria do desempenho termoenergético e conforto do usuário na fase de uso operacional da

edificação, sendo imprescindíveis para os cenários de clima futuro. Foi possível verificar o grau de influência das medidas nos diferentes cenários climáticos, tendo algumas diferenças nos comportamentos por cenário e indicador avaliado, constatando-se desta forma a importância da avaliação com cenários de clima futuro para os projetos que estão sendo construídos para o setor de HIS. Para São Paulo, por causa da necessidade de aquecimento ser alta somente no cenário climático considerado atual, algumas medidas mostraram diferenças com relação ao grau de influência nos cenários climáticos futuros. Medidas de adaptação avaliadas de forma isolada, mostraram para a cidade de São Paulo, serem muito efetivas aquelas relacionadas à melhoria no desempenho das paredes e das coberturas. Para Salvador foram mais significativas medidas com relação à absorção solar tanto de paredes quanto da cobertura, assim como medidas relacionadas às esquadrias, tanto no uso do sombreamento quanto no aumento nas dimensões e fator de ventilação. Em Salvador, as medidas de adaptação analisadas mostraram por vezes comportamentos muito diferentes entre os indicadores avaliados, mostrando a necessidade de considerar-se mais parâmetros na avaliação.

As medidas de adaptação aplicadas em conjunto mostraram resultados ainda mais expressivos para a melhoria do desempenho termoenergético e de emissões de CO₂ na operação do que o uso de medidas isoladas tanto nos cenários atual quanto futuros. O potencial possível de melhoria ficou evidente, mesmo ao considerar-se o cenário climático de 2050. Contudo, outros benefícios devem ser analisados considerando maiores mudanças no projeto em função de tipologia, entre outros. Para São Paulo, o tipo de parede mostrou uma tendência significativa no comportamento da edificação. As medidas de adaptação mostraram maiores reduções para o caso na cidade de São Paulo, com relação ao indicador na operação com ventilação natural com maior ênfase no cenário climático atual. As mudanças climáticas mostraram grande influência no comportamento termoenergético operacional futuro das habitações de interesse social. O projeto representativo da casa unifamiliar isolada que já mostrou baixo desempenho na operação, no cenário climático atual ficaria com desempenho termoenergético ainda mais comprometido nos cenários climáticos futuros. E tradicionalmente projetos são avaliados considerando dados climáticos de anos anteriores que não levam em consideração a vida útil da edificação, estimada em no mínimo 50 anos. É necessária uma mudança com relação a forma de pensar os projetos. As medidas de adaptação de eficiência energética, aplicadas em conjunto, têm potencial para ampla melhoria nos

indicadores analisados tanto nos cenários climáticos atual quanto futuros. Sem a incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos que estão sendo construídos para o setor de HIS na atualidade, a tendência é criar edificações que causaram aumento no consumo energético de condicionamento artificial e nas emissões de CO₂ associadas, além de maior desconforto aos usuários. Isso para o país pode trazer um alto impacto no seu consumo de recursos. Dessa forma, a incorporação de medidas de eficiência energética nos projetos de habitações de interesse social que estão sendo construídos na atualidade coloca-se como fundamental para minimizar os efeitos das mudanças climáticas nas próximas décadas.

Na última etapa da pesquisa foram escolhidos quatro casos por cidade, os quais foram comparados com o caso base, por meio de uma abordagem integrada proposta que previu a integração de indicadores que consideraram aspectos de sustentabilidade no ciclo de vida energético da edificação com integração das mudanças climáticas. O estabelecimento da abordagem proposta mostrou-se possível mesmo com as limitações que se têm na atualidade de dados nacionais com relação à energia e a emissões incorporadas nos materiais. Contudo, foram evidenciadas a carência de dados nacionais e a necessidade de dados com relação a declarações de impacto dos materiais por parte dos fornecedores. Entre os dados avaliados, apresentaram maior significância os correspondentes aos serviços de alvenaria, cobertura e esquadrias. Com relação ao transporte, demonstrou-se muito importante a especificação de distâncias reais para as cidades estudadas, pois o peso em ambas as cidades foi diferente, em especial com relação a alguns materiais. Para Salvador o peso do transporte foi maior em virtude das maiores distâncias observadas de vários materiais, com relação a São Paulo. Constatou que dados com relação à energia incorporada, emissões, densidade de massa aparente e vida útil dos materiais, podem alterar os resultados e *ranking* entre os casos avaliados. A simplificação na fase de pós-uso, mostrou-se adequada para a tipologia analisada, pelo pouco peso no ciclo de vida desta fase e por não ser considerado cenário de reciclagem. A consideração do consumo com condicionamento ambiental previsto julgou-se muito importante como forma de prever impactos, o qual teve desempenho diferenciado para as duas cidades e, em especial, por causa das mudanças climáticas. A proposta do Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético, tanto gráfico quanto numérico, mostrou-se apropriada tanto para integrar os conceitos propostos quanto para visualizar, de forma fácil, o desempenho dos casos, tanto para os indicadores intermediários

quanto para os indicadores finais. Igualmente como forma de dar subsídio às decisões de projeto considerando uma abordagem mais holística.

Na avaliação com indicadores intermediários o caso base em São Paulo mostrou o pior desempenho nos indicadores da fase de uso operacional. Na comparação dos casos avaliados em São Paulo, o custo operacional observado no caso base foi maior do que os casos com medidas de adaptação. Entretanto, não foi suficientemente grande quando comparado com o investimento realizado nas medidas de adaptação, considerando os cenários climáticos atual e de 2020, pois, de forma geral, o consumo energético operacional nesta cidade foi baixo no ciclo de vida. Contudo, no cenário de 2050, duas das alternativas avaliadas na cidade de São Paulo mostraram custo menor no ciclo de vida do que o caso base.

Para Salvador, o caso base teve o menor custo no ciclo de vida em todos os cenários climáticos, no entanto, a diferença com os outros casos avaliados não foi significativa para os cenários climáticos futuros. Na análise econômica, o transporte, além dos materiais iniciais, teve peso significativo para os casos em Salvador.

A abordagem proposta deixou em evidência a importância da seleção inicial de materiais nos projetos, tanto em termos dos seus impactos associados quanto do desempenho termoenergético ocasionado na edificação na sua vida útil. As avaliações em ambas as cidades mostraram diferenças significativas, em especial com relação a valores absolutos no ciclo de vida. Para todos os indicadores analisados, os casos na cidade de Salvador tiveram impacto significativamente superior aos casos em São Paulo, isso por conta do clima de Salvador mostrar temperaturas mais elevadas que implicam no aumento do consumo de condicionamento ambiental e em maior desconforto térmico do usuário na operação da edificação.

Considerando-se pesos iguais para todos os indicadores, os casos com medidas de eficiência energética incorporadas, mostraram ampla redução com relação ao caso base nos indicadores de consumo energético, emissões de CO₂ no ciclo de vida e graus-hora de resfriamento e aquecimento. O caso base mostrou desempenho superior somente no indicador de custos no ciclo de vida, mostrando que, considerando esse critério e, com o custo da energia atual seriam necessários investimentos mais limitados do que os apresentados nos casos avaliados. Porém, quando avaliados todos os indicadores de forma integrada, todos os casos com medidas de adaptação mostraram melhoria com relação ao caso base, frente ao Índice de Sustentabilidade no Ciclo de Vida Energético proposto

obtendo o melhor caso colocado para ambas as cidades, redução em torno de 52% quando comparado ao Índice do caso base.

A abordagem integrada proposta justifica um maior investimento com relação a medidas de eficiência energética nos projetos do setor de habitações de interesse social, desde uma perspectiva de sustentabilidade e no ciclo de vida das edificações. Continuar da forma em que estão sendo projetadas as edificações para o setor vai acarretar um maior consumo de recursos ao país e maiores emissões de CO₂, ao considerar-se as mudanças esperadas no clima no futuro, assim como um maior desconforto dos usuários. Falhando dessa forma em proporcionar habitações adequadas aos usuários. Isso pode causar além de falta de bem-estar do usuário possíveis problemas de saúde associados. Os impactos relacionados à operação da edificação mostraram-se de maior influência no ciclo de vida para os indicadores de consumo energético, emissões de CO₂ e conforto do usuário. Igualmente no indicador do aspecto econômico quando considerado o cenário de 2050.

A pesquisa também demonstrou que desempenho adequado nas edificações pode ser obtido de diversas maneiras e deixou evidente o grande potencial de melhoria para os projetos da prática atual no setor. Entretanto, entende-se que a arquitetura não deve limitar-se somente a edificações com bom desempenho térmico, sendo o tema muito mais amplo. Acredita-se ser necessário que, além de bom desempenho termoenergético e considerar-se arquitetura bioclimática, a arquitetura das habitações deve proporcionar alta qualidade tanto arquitetônica quanto ambiental. Assim, espera-se que comparações possam ser realizadas usando a abordagem proposta, considerando outro tipo de projetos. Dessa forma, as soluções aqui apontadas podem indicar caminhos para estudos de novas tipologias ou avanços nas próprias tipologias existentes de forma a associarem abordagens mais integradas.

A abordagem integrada proposta mostrou-se adequada aos objetivos estabelecidos na pesquisa e oferece subsídio nas decisões de projeto. Acredita-se ser necessária a mudança de paradigmas, bem como o estabelecimento de novos critérios para a especificação de projetos que vão muito além de considerações imediatas como custo mínimo inicial. Sendo assim, o investimento em programas nacionais de habitação deve ter uma perspectiva em longo prazo com a adoção de parâmetros para a priorização de projetos que devem ser adotados com base no desempenho levando em conta a vida útil do edifício e os benefícios e impactos. A pesquisa contribuiu ao considerar o ciclo de vida das edificações, mudanças climáticas e uma abordagem mais holística para a avaliação

dos projetos que estão sendo construídos para o setor, de forma a que obtenham melhor desempenho energético com conforto térmico, assim como menor consumo de recursos em longo prazo para os usuários e o país.

8.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Algumas limitações foram levantadas pelo trabalho e estão descritas na sequência:

- Nas simulações com cenários climáticos futuros os arquivos usados não foram de modelos regionais que considerassem os dados de previsão do último relatório do IPCC para São Paulo e Salvador, pois foram usados com base em modelos globais usados no terceiro e no quarto relatório. Dessa forma, os resultados mostrados podem apresentar diferenças ante o uso de dados regionais. Igualmente, e dadas as incertezas com relação a cenários de climas futuros, os resultados aqui apresentados devem ser tratados como apresentando uma tendência e não como valores absolutos.
- Somente foi considerado um cenário climático futuro com base no relatório AR3 e 4 do IPCC. Da mesma forma o arquivo climático TRY considerado para o cenário climático atual não é um arquivo recente.
- As simulações foram realizadas somente com um tipo de comportamento de usuário, em relação ao fechamento/abertura de janelas e venezianas com base na Etiqueta de Energia. Outros comportamentos de usuários podem alterar os resultados, em especial em relação às paredes que apresentam isolamento e maior massa térmica, como o caso da parede de concreto analisada, especialmente, para São Paulo.
- Os dados elencados nesta pesquisa com relação a energia incorporada e emissões de CO₂ incorporada dos materiais foram principalmente obtidos de pesquisas nacionais que, na maioria das vezes, apresentaram somente um desses indicadores. Falta, portanto, uma base de dados nacionais sólida sobre o impacto dos materiais de construção que apresente informações relevantes com relação aos fornecedores.

- Por ser realizada uma avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) foram considerados como impacto somente as emissões de CO₂ e o consumo energético no ciclo de vida. Entende-se que uma ACV pode considerar muitos outros impactos que podem também ser relevantes.
- Indicadores relacionados ao conforto térmico do usuário foram considerados como abordando de certa forma o aspecto social, pelo foco da pesquisa estar no desempenho termoenergético da edificação. Contudo, reconhece-se que estudos de ACV social consideram muitos outros indicadores, que fogem ao foco desta pesquisa.
- Falta de análise de sensibilidade. A mesma não foi realizada por causa do tamanho da pesquisa e da quantidade de dados que estavam sendo analisados. Contudo, foram realizadas algumas análises isoladas ao longo do trabalho. Com elas, observou-se que dados com relação a energia incorporada, emissões incorporadas, densidade de massa aparente dos materiais, vida útil, distâncias no transporte e custo dos materiais podem alterar alguns resultados. Contudo, observou-se de forma usual, a manutenção do melhor desempenho na abordagem proposta, dos casos com medidas de adaptação em relação ao caso base.
- Foram utilizados, na medida do possível, os materiais disponíveis na tabela de custos do SINAPI. Contudo, foi constatado a inexistência de alguns materiais na base do SINAPI, sendo que a mesma deve ser usada como referência nacional para projetos de habitação de interesse social. Da mesma forma, não são disponibilizados nessas tabelas dados médios com relação ao peso do material. Assim sendo, alguns dados foram estimados com base em fornecedores, quando disponibilizados; com base em materiais semelhantes; e/ou conforme o projeto e detalhe estimado do componente.
- As tabelas SINAPI incluem o desperdício colocado no material, porém não é deixado em evidência de forma que possa ser usado nas diferentes análises realizadas. Essa informação é muito relevante para a análise do ciclo de vida.
- Os dados com relação ao custo dos materiais e componentes na fase de pós-uso foram limitados, pois observou-se ausência de dados sobre custo de desmontagem/retirada/demolição de muitos materiais e componentes nas tabelas do SINAPI.

- Informações sobre a vida útil de materiais e componentes considerou dados nacionais da NBR 15575, contudo constatou-se carência de referências mais precisas sobre estimativa da vida útil para os componentes/materiais e a edificação em si.
- A fase de pós-uso com relação ao indicador energético e ambiental foi calculada como uma porcentagem estimada da fase de pré-uso, com base em resultados observados em pesquisas nacionais da mesma tipologia. Assim, o cálculo considerou-se como uma estimativa. Igualmente tem-se carência de dados nacionais para cálculo dessa fase e o destino final e reciclagem de materiais e componentes.
- A abordagem integrada proposta foi com base em uma análise multicritério simplificada que considerou pesos iguais para os indicadores intermediários e finais propostos. Seria necessário um painel de especialistas e uma avaliação multicritério mais aprofundada para estabelecer pesos diferentes aos indicadores, o que poderia fornecer resultados diferentes dos aqui apresentados.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, foram levantadas as que seguem:

- Desenvolvimento de base nacional com arquivos regionais que considerem cenários climáticos futuros para simulação termoenergética de edificações.
- Elaboração de base de dados de materiais para construção civil a ser usada em análises que integrem o ciclo de vida nas edificações, de forma a mostrar a variação nos dados e agregar dados de impactos com relação à consumo de energia e emissões de CO₂ incorporadas, assim como dados com relação a custos.
- Integração de base de dados de materiais e impactos a partir de uma perspectiva multicritério, com a modelagem em plataforma BIM.
- Criação de ferramenta computacional que contemple a análise integrada proposta com os dados levantados e inclua análise de sensibilidade das variáveis adotadas.

- Análise da abordagem proposta com diferentes perfis de usuários e incorporação de outros impactos.
- Considerar a abordagem integrada proposta integrando pesos diferentes aos indicadores abordados por meio de painel de especialistas.
- Desenvolvimento de mecanismos simplificados que vinculem a abordagem integrada proposta às políticas públicas de programas habitacionais de forma que auxiliem na avaliação dos projetos propostos e desenvolvidos, em especial das companhias de habitação.

REFERÊNCIAS

ABC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COHABS E AGENTES PÚBLICOS DE HABITAÇÃO. **Site institucional**. Disponível em: <<http://www.abc.habitacao.org.br/>>. Acesso em: 15 fev. 2014.

ABNT. **NBR 9050**. Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. 2004

ABNT. **NBR 15220-2**. Norma de desempenho térmico de edificações Parte 2 : Métodos de cálculo da transmitância térmica , da capacidade térmica , do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. p. 1–21, 2005a.

ABNT. **NBR 15220-3**. Norma de desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 2005b.

ABNT. **NBR 15575-1**. Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio. 2013.

ABNT **NBR ISO 14040**. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. 2009a.

ABNT **NBR ISO 14044**. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações. 2009b.

AÇÃO NOTÍCIAS. **Ação Notícias**. **Site institucional**. Disponível em: <http://acaonoticias.com.br/an/index.php?option=com_content&view=article&id=4234:familias-do-programa-municipal-de-urbanizacao-do-rio-camacari-participam-de-sorteio&catid=101:camacari&Itemid=492>. Acesso em: 13 mar. 2013.

ADALBERTH, K. Energy use during the Life Cycle of Buildings : a Method. **Building and Environment**, v. 32, n. 4, p. 317–320, 1997.

AGEHAB - Agência Goiana de Habitação. **Site institucional**. Disponível em: <<http://site.agehab.go.gov.br/index.php>>. Acesso em: 17 mar. 2013.

AGOPYAN, V.; SOUZA, U.E.L. DE; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. DE. Alternativas para Redução do Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obra. In: CARLOS TORRES FORMOSO; INO, A.(Eds.). **Coletânea Habitar.Inovação, Gestão da Qualidade e Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional**. Porto Alegre: ANTAC, 2003.

AGOPYAN, V. ET AL. Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras. **Relatório Final**. PCC-USP/FINEP/ITQC, 5 volumes. 1998.

AKADIRI, P. O.; OLOMOLAIYE, P. O.; CHINYIO, E. A. Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. **Automation in Construction**, v. 30, p. 113–125, 2013.

ALMEIDA, L. S. S.; SILVA, A. S.; SCHNEIDER, K.; GHISI, E. **Avaliação da envoltória de habitações de interesse social de Florianópolis de acordo com o método prescritivo da Etiqueta de Energia**. XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VIII ELACAC - Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Brasília: 2013

ALMEIDA, L. S. S. **Influência de Parâmetros Físicos e geométricos no Desempenho Termoenergético de Habitações Unifamiliares**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

ALVES, C. A.; DUARTE, D. H. S.; GONÇALVES, F. L. T. **Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo**. XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Campinas, Brasil: 2015a

ALVES, C. A.; DUARTE, D. H. S.; GONÇALVES, F. L. T. **Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo** . Parte 2: estudo de caso - desempenho térmico de edifícios residenciais de idosos. XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**2015b

ANASTASELOS, D.; GIAMA, E.; PAPADOPOULOS, A. M. An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1165–1171, nov. 2009.

ANEEL. **Site institucional**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4101&id_area=90>. Acesso em: 15 maio. 2015.

ARAÚJO, M. P. S.; BANDEIRA, R. A. M.; CAMPOS, V. B. G. Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise

comparativa entre autônomos e empresa. **Journal of Transport Literature**, v. 8, n. 4, p. 187–226, 2014.

ASDRUBALI, F.; BALDASSARRI, C.; FTHENAKIS, V. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 73–89, set. 2013.

ASHRAE. **ASHRAE STANDARD 55**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: 2013.

ATTIA, S.; EVRARD, A.; GRATIA, E. Development of benchmark models for the Egyptian residential buildings sector. **Applied Energy**, v. 94, p. 270–284, jun. 2012.

AYAZ, E.; YANG, F. **Zero Carbon Isn't Really Zero: Why Embodied Carbon in Materials Can't Be Ignored**. Disponível em: <http://www.di.net/articles/zero_carbon>. 2009.

BAEK, C. et al. Life cycle carbon dioxide assessment tool for buildings in the schematic design phase. **Energy and Buildings**, v. 61, p. 275–287, jun. 2013.

BAJAY, S.V.; SANT'ANA, P.H.M, de. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria. Relatório setorial cal e gesso**. Brasília: CNI, 2010.

BALARAS, C. A. et al. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. **Building and Environment**, v. 42, n. 3, p. 1298–1314, mar. 2007.

BALCOMB, J. D.; CURTNER, A. Multi-criteria decision-making process for buildings. **Collection of Technical Papers**. 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), v. 1, n. June, 2000.

BASBAGILL, J. et al. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. **Building and Environment**, v. 60, p. 81–92, fev. 2013.

BASTOS, J.; BATTERMAN, S. A.; FREIRE, F. Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 344–353, nov. 2013.

BATISTA, J. O. **Eficácia da ventilação mecânica noturna para resfriamento: Impacto de estratégias híbridas de ventilação no**

desempenho térmico de residência em Florianópolis, SC. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

BAYER, C.; GAMBLE, M.; GENTRY, R. **AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice.** Disponível em: <<http://www.aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab082942.pdf>>. Washington: 2010.

BECKER, R.; PACIUK, M. Thermal comfort in residential buildings - Failure to predict by Standard model. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 948–960, 2009.

BELCHER, S.; HACKER, J.; POWELL, D. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, n. 1, p. 49–61, 1 jan. 2005.

BERGGREN, B.; HALL, M.; WALL, M. LCE analysis of buildings – Taking the step towards Net Zero Energy Buildings. **Energy and Buildings**, v. 62, p. 381–391, jul. 2013.

BESSA, V. T. M. **Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7898–7910, dez. 2010.

BOOTH, C.; HAMMOND, F. (Editors). **Solutions to Climate Change Challenges in the Built Environment.** RICS Research. (Innovation in the Built Environment). Wiley-Blackwell Publishing, 2012.

BRASIL. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.** Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/347281.html>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

BRASIL. **Portal Brasil.** Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/03/nova-fase-do-minha-casa-minha-vida-vai-contratar-2-milhoes-de-m>>. Acesso em: 13 jun. 2016a.

BRASIL. Programa Minha Casa Minha Vida. **Site Institucional.** Disponível em: <<http://www.minhacasaminhavid.gov.br/sobre-o>>

programa.html>. Acesso em: 13 mar. 2016b.

BRASIL; CIDADES, M. DAS; HABITAÇÃO, S. N. DE.

Especificações de desempenho nos empreendimentos de HIS baseadas na NBR 15575 – Edificações Habitacionais - Desempenho.

Disponível em: <http://cbic.org.br/sites/default/files/Documento para Especificações de Desempenho HIS - 2014_11_10.pdf>.p. 1–31, 2014.

BRASIL; MINCIDADES. **Especificações técnicas do PMCMV.**

Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/habitacao-cidades/programa-minha-casa-minha-vida-pmcmv/especificacoes-tecnicas>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030: Projeções.** Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_2.pdf>. 2007

BRASIL. Portal Brasil. **Site Institucional.** Disponível em:

<<http://www.brasil.gov.br/cidadania-e-justica/2012/02/empreendedorismo-social>>. Acesso em: 5 fev. 2016c.

BRASIL; MCT – MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Site institucional.** Disponível em:

<<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

BRASIL-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014.** Rio de Janeiro: 2015.

BRASIL. **Experiências em habitação de interesse social no Brasil.**

Disponível em:

<http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/mdc00005.pdf>.

Brasília: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação, 2007a.

BRASIL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética Edificações Residenciais.** Disponível

em:<<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>>. 2012.

BRASIL. **Programa Minha Casa , Minha Vida.** Disponível em:

<<http://www.cidades.gov.br/index.php/minha-casa-minha-vida>>. 2013a.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional.** 2013b.

BRASIL. Anexo da portaria INMETRO n° 50/2013. **Anexo Geral V -**

Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros.

Disponível em:

<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/anexos_rac/AnexoV.pdf>.2013a.

BRASIL; CIDADES, M. DAS. Plano Nacional de Habitação.

Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/index.php/plano-nacional-de-habitacao.html>>. 2009.

BRASIL; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA- EPE. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf>. 2013.

BRASIL; MDIC -MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. Resolução nº. 4 de 15 de dezembro de 2010 - Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida. Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/resc/pdf/RESC000236.pdf>>. 2010.

BRASIL; MINCIDADES. Portaria N. 363 de 11 de agosto de 2011, 2011b. Disponível em:

http://www.cidades.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=857:programa-nacional-de-habitacao&catid=94&Itemid=126. 2011a.

BRASIL; MINCIDADES. Portaria N. 465 de 3 de outubro de 2011, 2011b.

BRASIL; MINCIDADES. Instrução normativa N. 33 de 23 de outubro de 2012. Regulamenta o Programa de Apoio à Produção de Habitações,. Disponível em:

<http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/Instru%C3%A7%C3%B5esNormativas/IN_MCidades_2012_033_Apoio_a_Producao_Compilada.pdf>. 2012a..

BRASIL; MINCIDADES. Programa Minha Casa Minha Vida.

Disponível em:

<http://www.sedhab.df.gov.br/mapas_sicad/conferencias/programa_minha_casa_minha_vida.pdf>.2012b.

BRASIL; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Resultados do Universo do Censo Demográfico 2010. Disponível em:

<http://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/tabelas_pdf/tab6.pdf>. 2010.

BRASIL; ELETROBRÁS; PROCEL. Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - ano base 2005. 2007.

BRE-BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Site institucional.** Disponível em: <<http://www.impactwba.com/index.jsp>>. Acesso em: 3 mar. 2015.

BRIBIÁN, I. Z.; USÓN, A. A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n. 12, p. 2510–2520, dez. 2009.

BRODBECK, P. Gigantes do setor saem de fininho. **Gazeta do Povo**, nov. 2013.

BSI-BRITISH-STANDARDS. **BS ISO 15686-5:2008.** Buildings and constructed assets - Service-life planning - Part 5: Life-cycle costing. 2008.

BUCHANAN, A. H.; HONEY, B. G. Energy and carbon dioxide implications of building construction. **Energy and Buildings**, v. 20, n. 3, p. 205–217, jan. 1994.

C2ES. **Site institucional.** Disponível em: <<http://www.c2es.org/>>. 2013.

CAIXA. **Selo Casa Azul. Boas práticas para habitação mais sustentável.** . (Jhon, V. e Prado, R. T. A., Orgs.). São Paulo: Página & Letras, 2010.

CAIXA. **Projetos aprovados no PMCMV Faixa 1.** Disponível em: <[http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/habita/mcmv/Empreendimento os_MCMV_faixa1.pdf](http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/habita/mcmv/Empreendimento_MCMV_faixa1.pdf)>Acesso em: 13 ago. 2014.

CAIXA. **Circular No. 681 de 10 de Junho de 2015,** 2015. Disponível em:<<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/servlet/INPDFViewer?jornal=1&pagina=13&data=11/06/2015&captchafield=firistAccess>>. 2015.

CALDAS, L. et al. **Emissões De CO₂ no Ciclo De Vida De Habitações De Interesse Social : Estudo De Caso Para O Df-Brasil.** SIBRAGEC ELAGEC. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/sibraelagec2015/artigos/SIBRAGEC-ELAGEC_2015_submission_116.pdf>. **Anais...**São Carlos-SP: 2015.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais.** Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

CARMINATTI JÚNIOR, R. **Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitação de interesse social concebido em light steel framing.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em construção civil. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

CARVALHO, J, de. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil - Estudo de caso: Comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2002.

CARVALHO, E. Revista Casa & Mercado. **Arquitetura popular brasileira.** Disponível em: <<http://www.casaemercado.com.br/materia.php?hIdMateria=1544>>. 2013.

CASAGRANDE, B. G. **Cenários climáticos futuros : diagnóstico prospectivo do desempenho termoenergético.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia civil Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: 2013.

CEN. **CEN/TC 350 Sustainability of construction works.** Disponível em:<http://portailgroupe.afnor.fr/public_espacenormalisation/CENTC350/index.html>. 2016.

CHAROENKIT, S.; KUMAR, S. Environmental sustainability assessment tools for low carbon and climate resilient low income housing settlements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 509–525, 2014.

CIB. **Agenda 21 para a construção sustentável.** São Paulo, 2000.

CIB; UNEP-IETC. **Agenda 21 for sustainable construction in developing countries.** Disponível em: <<http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/Agenda21Book.pdf>>. CSIR Building and Construction Technology, 2002.

COELHO J. M. **Produto 43. Cadeia da cerâmica de revestimento.** MME - Ministério de Minas e Energia; Banco Mundial; J. Mendo Consultoria, ago. 2009.

COHAB CURITIBA. Companhia de Habitação Popular de Curitiba.

Site Institucional. Disponível em: <<http://www.cohabct.com.br>>. Acesso em: 07 ago. 2012.

COHAB PARÁ. Companhia de Habitação do Estado do Pará. **Site Institucional.** Disponível em: <<http://www.cohab.pa.gov.br>>. Acesso em: 12 ago. 2013.

COHAB SC. Companhia de Habitação do Estado de Santa Catarina. **Site Institucional.** Disponível em: <<http://www.cohab.sc.gov.br/>>. Acesso em: 07. Ago. 2012.

CONSELHO DO FGTS. **Resolução N. 702 de 4 de outubro de 2012,** 2012.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia.** Disponível em: <www.copel.com/>. Acesso em: 03 set. 2013.

COSTA, B. L. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia civil COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

CUB2D. **Site institucional.** Disponível em: <<http://www.cub2d.com/>>. Acesso em: 7 abr. 2015.

CUÉLLAR-FRANCA, R. M.; AZAPAGIC, A. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. **Building and Environment**, v. 54, p. 86–99, ago. 2012.

CULTRI, C.do N.; SAAVEDRA, Y.M.B.; OMETTO, A. **Indicadores sociais como subsídios para a avaliação social do ciclo de vida: Uma revisão da literatura.** In: XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Carlos, SP, 2010.

CURCIO, D. DA R.; DA SILVA, A. C. S. **Desempenho térmico de habitações de interesse social, em edifícios multifamiliares , produzidas pelo programa de arrendamento residencial – PAR, na cidade de Pelotas / RS.** XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VIII ELACAC -Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Brasília: 2013

DAHLSTRØM, O.; SØRNES, K.; ERIKSEN, S. T.; HERTWICH, E. G. Life cycle assessment of a single-family residence built to either conventional- or passive house standard. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 470–479, nov. 2012.

DALL'O', G.; GALANTE, A.; TORRI, M. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 211–219, maio 2012.

DASCALAKI, E. G. et al. Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3400–3409, dez. 2011.

DCLG - DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT: LONDON . **Building a Greener Future: Policy statement**. Disponível em: <[http://www.rbkc.gov.uk/PDF/80 Building a Greener Future Policy Statement July 2007.pdf](http://www.rbkc.gov.uk/PDF/80_Building_a_Greener_Future_Policy_Statement_July_2007.pdf)>. London:2007.

DE DEAR, R. **Recent enhancements to the adaptive comfort standard in ASHRAE 55-2010**. Proceedings of the 45th annual conference of the Architectural Science Association. The University of Sydney, 2011.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. **ASHRAE Transactions 104 (1a)**, p. 145–67, 1998.

DE VECCHI, R. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

DE VECCHI, R. et al. **Application of the adaptive model proposed by ASHRAE 55 in the Brazilian climate context : raising some issues**. 8th Windsor Conference. **Anais...Windsor**: 2014

DEANGELO FOTOS. **Site Institucional**. Disponível em: <<http://deangelofotos.blogspot.com.br/2010/08/rubens-lara.html>>. Acesso em: 20 ago. 2010.

DEPARTMENT OF ENERGY, FULLER, S. K. **Guidance on Life-Cycle Cost Analysis**. 2005.

DETR - DEPARTMENT OF ENVIRONMENT, TRANSPORT AND REGIONS. **Multi-Criteria Analysis – A Manual**. London: 2000.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1589–1597, 2011.

DOE - US DEPARTMENT OF ENERGY. **International Energy**

Outlook. Disponível em:

<<http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2010/>>. 2010.

DOE - US STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Life cycle costing program**. Disponível em:

<http://www1.eere.energy.gov/femp/information/download_blcc.html>. 2013.

E-CONSTRUMARKET. E-Construmarket. **Site institucional**.

Disponível em: <<http://www.e-construmarket.com.br>>. Acesso em: 7 jan. 2016.

ELETRONUCLEAR. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa. Ano base 2014/junho 2015**. Disponível em:

<<http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=-SpXJAgacxw=&tabid=396>>. 2015.

EUROPEAN-COMMISSION. **Adaptation to Climate Change**.

Disponível em:

<http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/index_en.htm>. Acesso em: 18 set. 2015.

FAMUYIBO, A. A.; DUFFY, A.; STRACHAN, P. Achieving a holistic view of the life cycle performance of existing dwellings.

Building and Environment, v. 70, n. 2, p. 90–101, 2013.

FEDRIGO, N. S. et al. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. Disponível em:

<http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_ic/I C2009_Natalia.pdf>. 2009.

FERRAZ, E.; JOHN, V.; BESSA, V. **CO₂ no Transporte**. 3 Simpósio Brasileiro de Construção Sustentável- Sustentabilidade nos Negócios e Instrumentos de Mudança. Disponível em:

<http://www.cbcs.org.br/sbcs10/website/userFiles/palestras_sbcs_10/emissao_co2_transporte.pdf>. **Anais...**São Paulo: 2010

FERREIRA, J.; PINHEIRO, M. D.; BRITO, J. DE. Refurbishment decision support tools review—Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects. **Energy Policy**, v. 62, p. 1453–1460, 2013.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. **NIST handbook 135: Life cycle costing manual for the Federal Energy Management Program**.

Disponível em:

<<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build96/PDF/b96121.pdf>>.1995.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Deficit Habitacional no Brasil 2011|2012****Deficit Habitacional No Brasil 2011-2012**. Disponível em: <<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/559-deficit-habitacional-2011-2012/file>>. Belo Horizonte, 2015a.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Deficit habitacional no Brasil 2013: resultados preliminares nota técnica**. Belo Horizonte: [s.n.].

Disponível em:

<<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/deficit-habitacional/596-nota-tecnica-deficit-habitacional-2013normalizadarevisada/file>>. Belo Horizonte, 2015b.

GARCIA, K. R. P. **Potencial de redução de las emisiones de CO2 y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera**. Tese de doutorado. Universidad Politécnica de Catalunya | Universidade de São Paulo, 2014.

GEORGIADOU, M. C.; HACKING, T.; GUTHRIE, P. A conceptual framework for future-proofing the energy performance of buildings. **Energy Policy**, v. 47, p. 145–155, ago.2012.

GERVÁSIO, H. et al. A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design. **Building and Environment**, v. 73, p. 256–270, mar. 2014.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4107–4120, ago. 2007.

GLUCH, P.; BAUMANN, H. The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. **Building and Environment**, v. 39, n. 5, p. 571–580, maio 2004.

GOMES, V.; SILVA, M. G. DA. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. (Eds.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

GOUVEIA, G.M.M.M.; SPOSTO, R.M. **Análise energético-ambiental de fachadas com foco na reciclagem. Estudo de caso com painéis de alumínio composto “ACM”**. Disponível em:

<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.181/5597>. In: Revista Arquitextos. 181.06 tecnologia, ano 16, jun. 2015

GRIEGO, D.; KRARTI, M.; HERNÁNDEZ-GUERRERO, A. Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 540–549, nov. 2012.

GRIGOLETTI, G. DE C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do rio grande do sul**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GUAN, L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 793–800, abr. 2009.

GUIMARÃES, V. DE A. et al. **Análise da evolução da eficiência energética no setor de transporte brasileiro**. XXVII ANPET - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Disponível em:

<http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/431_AC.pdf>. **Anais...** Belém, PA: 2013.

GUPTA, R.; GREGG, M. Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. **Building and Environment**, v. 55, p. 20–42, set. 2012.

GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A. Life cycle primary energy analysis of residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 2, p. 210–220, fev. 2010.

GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A.; SATHRE, R. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 2, p. 230–242, fev. 2010.

HABIB, R.C.M.M. Tempo de retorno energético de isolantes térmicos na climatização de edificações: Estudo de caso da lã de rocha na zona bioclimática 1 do Brasil. **Dissertação de mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon & Energy (ICE). Version 2.0**. Disponível em: <www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied>. University of Bath, 2011.

HERNANDEZ, P.; KENNY, P. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). **Energy**

and Buildings, v. 42, n. 6, p. 815–821, jun. 2010.

HOLCIM. **Relatório de sustentabilidade 2012-2013**. 2013.

IAB-SP. Instituto de Arquitetos de Brasil - Departamento São Paulo.

Site institucional do Disponível em: <<http://www.iabsp.org.br/>>.

Acesso em: 26 maio. 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E

ESTATÍSTICA. **Síntese Indicadores Sociais 2013. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/indicadoresminimos/sinteseindicsoais2013/>>. 2013

IBN-MOHAMMED, T. et al. Integrating economic considerations with operational and embodied emissions into a decision support system for the optimal ranking of building retrofit options. **Building and Environment**, v. 72, p. 82–101, fev. 2014.

IES. **Site Institucional**. Disponível em: <<http://www.iesve.com/about>>.

Acesso em: 5 jan. 2015.

INMETRO -INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Programa Brasileiro de Etiquetagem.Tabela de consumo de energia elétrica chuveiros**. Edição 01/2015. Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

INVIDIATA, A.; GHISIE. Life-cycle energy and cost analysis of window shading used to improve the thermal performance of houses. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1371–1383, jun. 2016a.

INVIDIATA, A.; GHISIE. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, 2016b.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR

STANDARDIZATION. **ISO 7730** - Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. 2005.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE.

Climate Change 2007 : Synthesis Report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em:

<http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm>. 2007.

IPCC. **IPCC Data Distribution Centre, HadCM3 climate scenario**

data. Disponível em: <http://www.ipcc-data.org/sres/hadcm3_download.html>. 2011.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<http://ar5-syr.ipcc.ch/>>. Geneva: 2014.

IPCC. IPCC - Data Distribution Centre. Site Institucional. Disponível em: <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/ipcc_scenarios.html>. 2011

IPCC; YPERSELE, J. VAN. IPCC Fifth Assessment Report (AR5) now underway. Update on Scenario Development: from SRES to RCPs. Disponível em: <https://unfccc.int/files/methods_and_science/research_and_systematic_observation/application/pdf/ipcc_van_yperssele.pdf>. Cancún, 2010.

ISLAM, H. Use of Material in Residential House Design: An Optimisation Approach Balancing Life Cycle Cost & Life Cycle Environmental Impact. Tese de doutorado. RMIT University, Melbourne, Australia, 2012.

ISLAM, H. et al. Life cycle assessment and life cycle cost implications of wall assemblages designs. **Energy and Buildings**, v. 104, p. 250–263, 2015.

ISO. International Standard. ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 2005.

ISO. ISO 14047. Environmental management - Life cycle impact assessment - Examples of application of ISO 140142. 2003.

ISO CONSTRUÇÕES. ISO Construções. Site Institucional. Disponível em: <<http://www.isoconstrucoes.com.br>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

ITC. Ranking ITC 2013. Site institucional. Disponível em: <<http://www.rankingitc.com.br>>. Acesso em: 15. dez. 2013.

IYER-RANIGA, U.; WONG, J. P. C. Evaluation of whole life cycle assessment for heritage buildings in Australia. **Building and Environment**, v. 47, p. 138–149, jan. 2012.

JENTSCH, M. F. et al. **Development of Climate Change Adapted Weather Files for Building Performance Simulation : Implications for Southeast Asia**. n. May, p. 1–6, 2009.

JENTSCH, M. F. et al. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, v. 55, p. 514–524, jul. 2013.

JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. S.; JAMES, P. A. B. Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 12, p. 2148–2168, jan. 2008.

JOHN, V. M. et al. **Projeto SUSHI – Sustainable Social Housing Initiative : uma abordagem para o desenvolvimento de projetos de his mais sustentáveis**. XI ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VII ELACAC -Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construido. **Anais...Búzios**: 2011.

KARIMPOUR, M. et al. Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. **Building and Environment**, v. 73, p. 106–114, mar. 2014.

KAVGIC, M. et al. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. **Building and Environment**, v. 45, n. 7, p. 1683–1697, jul. 2010.

KERSHAW, T.; EAMES, M.; COLEY, D. Assessing the risk of climate change for buildings: A comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations. **Building and Environment**, v. 46, n. 6, p. 1303–1308, jun. 2011.

KIKUMOTO, H. et al. Study on the future weather data considering the global and local climate change for building energy simulation. **Sustainable Cities and Society**, ago. 2014.

KLOEPFFER, W. Life cycle sustainability assessment of products, International. **Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 89–95, 2008.

KNEIFEL, J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 3, p. 333–340, mar. 2010.

KÖNIG, H. et al. **A life cycle approach to buildings**. Detail, Munich:

2010.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. et al. Quality of life and sustainability issues as seen by the population of low-income housing in the region of Campinas, Brazil. **Habitat International**, v. 30, n. 4, p. 1100–1114, dez. 2006.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; GRANJA, A. D. The concept of desired value as a stimulus for change in social housing in Brazil. **Habitat International**, v. 35, n. 3, p. 435–446, jul. 2011.

KUHN, E. A. **Avaliação da sustentabilidade ambiental do protótipo de habitação de interesse social Alvorada**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

LABEEE. **Site institucional**. Acesso em: 20 fev.2015.

LAMBERTS, R. et al. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. 2013.

LEAL JUNIOR, I. C. et al. Análise da matriz de transporte brasileira: Consumo de energia e emissão de CO₂. **Revista UNIABEU**, v. 8, n. 18, p. 49–64, 2015.

LI, J.; COLOMBIER, M. Managing carbon emissions in China through building energy efficiency. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 8, p. 2436–47, jun. 2009.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para mudanças climáticas**. Tese de doutorado. Paulo, 2010.

LINCK, G. I.; DE ALBERNARD, R. S.; GRIGOLETTI, G. DE C. **Avaliação do conforto térmico de habitações de interesse social da cidade de Santa Maria, RS , a partir da opinião dos usuários**. XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VIII ELACAC -Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Brasília: 2013

MANFREDINI, C. **Impactos ambientais causados pelas indústrias de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2003.

MANFREDINI, C.; SATTTLER, M. A. Estimativa da energia incorporada a materiais de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul.

Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-37, jan./mar. 2005.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25–32, 2014.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima Atual e Definição das Aletações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI**. Brasília: 2006.

MASTELLA, D. V. **Comparação entre os processos de produção de blocos cerâmicos e de concreto para alvenaria estrutural, através da análise do ciclo de vida**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2002.

MCKINSEY. **Pathways to a Low-Carbon Economy**. Disponível em: <http://www.mckinsey.com/client_service/sustainability/latest_thinking/pathways_to_a_low_carbon_economy>. 2009.

MELCHERT, L. The Dutch sustainable building policy: A model for developing countries? **Building and Environment**, v. 42, n. 2, p. 893–901, fev. 2007.

MIKUČIONIENĖ, R.; MARTINAITIS, V.; KERAS, E. Evaluation of energy efficiency measures sustainability by decision tree method. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 64–71, jun. 2014.

MONAHAN J.; POWELL, J.C. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 179–188, 2011.

MONFORT, E.; A. MEZQUITA, A.; VAQUER, E.; ALVESB, H.J.; MELCHIADES, F.G.; BOSCHI, A.O. **Brasil x Espanha: Consumo de Energia Térmica e Emissões de CO₂ Envolvidos na Fabricação de Revestimentos Cerâmicos**. Cerâmica Industrial, 16 (4) jul./ago., 2011.

MONTENEGRO, A. DE A. **Avaliação do Retorno de Investimento em Sistemas Fotovoltaicos Integrados à Residências Unifamiliares Urbanas no Brasil**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

MORRISSEY, J.; HORNE, R. E. Life cycle cost implications of energy

efficiency measures in new residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 915–924, abr. 2011.

MRV. **Site Institucional MRV Engenharia**. Disponível em: <<http://www.mrv.com.br/>>. Acesso em: 26 mar. 2014.

MUNARIM, U. **Benefícios ambientais da preservação do patrimônio edificado: Análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs. nova construção**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2014.

MUNIER, N. **Multicriteria Environmental Assessment: A Practical Guide**. Dordrecht, The netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.

NABUT NETO, A. C. **Energia incorporada e emissões de CO₂ de fachadas. Estudo de caso do steel frame para utilização em Brasília**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2011.

NIK, V. M.; SASIC KALAGASIDIS, A. Impact study of the climate change on the energy performance of the building stock in Stockholm considering four climate uncertainties. **Building and Environment**, v. 60, p. 291–304, fev. 2013.

NTC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES DE CARGAS E LOGÍSTICA. **Relatório mensal do INCTF e o INCTL**. Março 2016.

OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, out./dez. 2014.

ORDENES, M. et al. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3**. LabEEE, UFSC. Florianópolis. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Biblioteca_Materiais_VisualDOE.pdf>. 2003.

OSMANI, M.; O'REILLY, A. Feasibility of zero carbon homes in England by 2016: A house builder's perspective. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1917–1924, set. 2009.

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and

economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, v. 63, p. 716–725, dez. 2013.

PALACIO, C. D. U. **Energia incorporada de vedações para habitação de interesse social considerando-se o desempenho térmico: Estudo de caso com utilização do Light Steel Frame no entorno do DF**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2013.

PANÃO, M. J. N. Revisiting cooling energy requirements of residential buildings in Portugal in light of climate change. **Energy and Buildings**, mar. 2014.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “My house my life”. **Energy and Buildings**, v. 57, n. 2013, p. 95–102, fev. 2013.

PEETERS, L. et al. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 772–780, 2009.

PEREIRA, F. O. R.; KREMER, A.; KUCHENBECKER, L. C. **An experiment on the climatic suitability of low-cost housing**. PLEA Conference. **Anais...**Brisbane, Austrália: 1999.

PEREIRA, M.F.B. **Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: Estudo de caso**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

PEREIRA, S. W. **Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos: Aplicação de avaliação do ciclo de vida**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. UFSC. Florianópolis, 2004.

PEREIRA, V. Especial - Construtoras menores lideram “Minha Casa, Minha Vida”. **O Estado de Sao Paulo**, 2011.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, jan. 2008.

PEUPORTIER, B.; THIERS, S.; GUIAVARCH, A. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 73–78, jan. 2013.

- PIRES, J. R. et al. **Investigação da influência da forma da planta do edifício nas condições de conforto térmico em unidades habitacionais de interesse social no município de Porto Alegre/RS.** XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VIII ELACAC - Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Brasília: 2013
- POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8, n. 4, p. 365–381, 2004.
- PORRITT, S. et al. Adapting dwellings for heat waves. **Sustainable Cities and Society**, v. 1, n. 2, p. 81–90, 2011.
- RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, out. 2010.
- RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle approach in evaluating energy performance of residential buildings in Indian context. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 259–265, 2012.
- REN, Z.; CHEN, Z.; WANG, X. Climate change adaptation pathways for Australian residential buildings. **Building and Environment**, v. 46, n. 11, p. 2398–2412, nov. 2011.
- RIBEIRO, F. DE M. **Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil- Usina de Itaipu : primeira aproximação.** Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2003.
- RICS – ROYAL INSTITUTION OF CHARTERED SURVEYORS. **Methodology to calculate embodied carbon of materials.** 1 ed. Londres, 2012.
- RISHOLT, B.; TIME, B.; HESTNES, A. G. Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 217–224, maio 2013.
- ROBERT, A.; KUMMERT, M. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. **Building and Environment**, v. 55, p. 150–158, set. 2012.
- RODERS, M.; STRAUB, A. Assessment of the likelihood of

implementation strategies for climate change adaptation measures in Dutch social housing. **Building and Environment**, v. 83, p. 168–176, 2014.

ROSA, R.P.da. **Consumo energético para produção de blocos de concreto: estudo comparativo com blocos cerâmicos através da avaliação do ciclo de vida**. Trabalho de diplomação. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2010.

ROSSI, B.; MARIQUE, A.-F.; REITER, S. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. **Building and Environment**, v. 51, p. 402–407, maio 2012.

ROULET, C. A. et al. ORME: A multicriteria rating methodology for buildings. **Building and Environment**, v. 37, n. 6, p. 579–586, 2002.

SAN-JOSÉ, J. T. et al. Approach to the quantification of the sustainable value in industrial buildings. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3916–3923, 2007.

SANTOS, L. J. C. **Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

SANTOS, A. H. C. **Eficiência Energética e a Contribuição dos Gases Combustíveis: Análise de Caso das Políticas de Avaliação de Edificações**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2011.

SANTOS, I. G.; PEREIRA, A. F. **Comparação entre dois sistemas de fachada (alvenaria e vidro)**. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). **Anais...**Fortaleza: 2008

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 249–257, mar. 2007.

SATTLER, M. A.; KUHN, E. A.; DE SOUZA, D. T. P. **Embodied Energy in Wall Subsystems of More Sustainable Buildings**. 26th PLEA 2009 Conference on Passive and Low Energy Architecture. n. June, p. 22–24, Quebec, 2009.

SCALCO, VERIDIANA ATANASIO FOSSATI, M. et al. Innovations in the Brazilian regulations for energy efficiency of residential buildings. **Architectural Science Review (Sydney)**, v. 55, p. 71–81,

2012.

SCHADE, J. **Life cycle cost calculation models for buildings**. p. 1–9, 2003.

SCHAEFER, A. et al. **Determinação de modelos de habitação de interesse social da Grande Florianópolis para uso em simulação computacional**. IV Workshop - Rede de Pesquisa: Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social. **Anais...Aracaju**: 2012

SCHAEFER, A.; GHISI, E. **Desenvolvimento de um protótipo de habitação de interesse social para simulação computacional**. III Workshop - Rede de Pesquisa: Uso racional de água e eficiência energética em habitações de interesse social,. **Anais...Curitiba**: 2012

SCHAEFER, A.; GHISI, E. Method for obtaining reference buildings. **Energy and Buildings**, v. 128, n. 3, p. 660–672, jul. 2016.

SILVA J. O. da. **Produto RT 72. Perfil da Cal.**, MME - Ministério de Minas e Energia; Banco Mundial; J. Mendo Consultoria, set. 2009.

SILVA, A. S. et al. **Usos finais de eletricidade e rotinas de uso como base para estratégias de eficiência energética por meio de auditoria residencial**. II ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VIII ELACAC - Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...Brasília**: 2013a

SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2013b.

SILVA, R. B.; DE PAULA, J. M. B.; BARBIRATO, G. M. **Programas de habitação social e qualidade de projeto : avaliação de arranjo construtivo e de condições térmicas internas de habitação no contexto climático de Maceió - AL**. XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VIII ELACAC -Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...Brasília**: 2013

SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J.; PINHEIRO, M. D. From the new European Standards to an environmental, energy and economic assessment of building assemblies from cradle-to-cradle (3E-C2C). **Energy and Buildings**, v. 64, p. 199–208, set. 2013.

SOARES, S. R.; DE SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **A avaliação do**

ciclo de vida no contexto da construção civil. Coletânea Habitaré, Volume 7, 2006.

SOARES, S. R.; PEREIRA, S. W. Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida. **Revista Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 83–94, 2004.

SOBREIRA, V. Governo Federal entrega 487 casas do programa Minha Casa, Minha Vida, em Timbaúba. **Blog do Jamildo**, 2013.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 2009.

SORGATO, M. J. **A Influência do Comportamento do Usuário no Desempenho Térmico e Energético de Edificações Residenciais.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R. **Relatório Técnico da base de simulações para o RTQ-R. Relatório Técnico: RT_LABEEE-2011/02.** Disponível em:

<http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/SORGATO_2011_Relatorio_Tecnico_da_Base_de_Simulacoes_para_o_RTQ-R.pdf>. Florianópolis: 2011.

SOUZA, M.P.R, de. **Avaliação das emissões de CO₂ antrópico associadas ao processo de produção do concreto , durante a construção de um edifício comercial, na Região Metropolitana de São Paulo.** Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. São Paulo: 2012.

SOZER, H. Improving energy efficiency through the design of the building envelope. **Building and Environment**, v. 45, n. 12, p. 2581–2593, dez. 2010.

SPERB, M. R. **Avaliação de tipologias habitacionais a partir da caracterização de impactos ambientais relacionados a materiais de construção.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

STACHERA JR, T. **Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil:um estudo de caso da habitação de interesse.** XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Disponível em:<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_090_5424>

54_12351.pdf>**Anais...**Rio de Janeiro: 2008.

STACHERA JR, T.; CASAGRANDE JR, E. F. **Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná.** In: IX ENGEMA - Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. Curitiba, 2007.

STEPHAN, A.; CRAWFORD, R. H.; DE MYTTENAERE, K. Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 592–600, dez. 2012.

SUSTAINABLE ENERGY RESEARCH GROUP.

CCWorldWeatherGen. Disponível em:

<<http://www.energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>>. Acesso em: 30 out. 2014.

TABORIANSKI, V. M. **Avaliação comparativa do impacto ambiental das tipologias de aquecimento de água para uso residencial.** Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2002.

TABORIANSKI, V. M.; SIMONI, R. A.; PRADO, R. T. A. **Elaboração de inventário de consumo de energia no ciclo de vida dos materiais utilizados em fachadas de edifícios no Brasil.** XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC. **Anais...**Fortaleza: 2008.

TALEGHANI, M. et al. Energy use impact of and thermal comfort in different urban block types in the Netherlands. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 166–175, dez. 2013.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise de ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. **Ciclo de vida das edificações.** I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC. **Anais...**São Paulo: 2004

TERÉS-ZUBIAGA, J. et al. Field assessment of thermal behaviour of social housing apartments in Bilbao, Northern Spain. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 118–135, dez. 2013.

THOMPSON, M.; COOPER, I.; GETHING, B. **The business case for adapting buildings to climate change : Niche or mainstream?**

Disponível em:

<https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/430507/Report_BusinessCaseForAdaptingBuildingsToClimateChange_webfinal.pdf>. Innovate UK: 2015.

TINGLEY, D. D.; DAVISON, B. Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. **Building and Environment**, v. 57, p. 387–395, nov. 2012.

TRIANA, M. A.; GHISI, E. **Benefícios para aplicação do Selo Casa Azul: Categorias Eficiência Energética e Projeto e Conforto**. Rio de Janeiro: 2013.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R. **Proposta de incorporação de estratégias para melhoria de desempenho térmico e uso racional de energia em projeto de habitação de interesse social em Florianópolis**. XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído / VIII ELACAC - Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Brasília: 2013.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, n. December 2014, p. 524–541, 2015.

UNEP. **Projeto Sustainable Social Housing Initiative - Sushi - Relatório 1: Mapeamento dos principais interessados e dos processos que afetam a seleção de soluções (tecnologias e materiais) para projetos de habitação social – São Paulo, Brasil**. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/1_Mapeamento_090511.pdf>. 2010a.

UNEP. **Projeto Sustainable Social Housing Initiative - Sushi - Relatório 3: Avaliação das tecnologias existentes no mercado e soluções para melhorar a eficiência energética e o uso racional da água em habitação de interesse social no Brasil**. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/3_Avaliacao_120511.pdf>. 2010b.

UNEP. **Common Carbon Metric draft for pilot testing**. Disponível em: <http://www.unep.org/sbci/pdfs/Common-Carbon-Metric-for-Pilot-Testing_220410.pdf>. 2010.

UNEP. **Policy coherence of the sustainable development goals. A natural resource perspective**. Disponível em:

<http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/50244/publications/Policy_Coherenceofthe_Sustainable_DevelopmentGoals.pdf>. 2015.

UNEP; SETAC. **Towards a life cycle sustainability assessment - Making informed choices on products.** Life Cycle Initiative: 2011.

UNEP; WMO; IPCC. **IPCC Special Report - Emissions Scenarios.** 2000.

UTAMA, A.; GHEEWALA, S. H. Indonesian residential high rise buildings: A life cycle energy assessment. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1263–1268, nov. 2009.

VAN HOOFF, T. et al. On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. **Building and Environment**, v. 82, p. 300–316, dez. 2014.

VERSAGE, R. DE S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

VILLARINHOROSA, L.; HADDAD, A. N. Building Sustainability Assessment throughout Multicriteria Decision Making. **Journal of Construction Engineering**, v. 2013, p. 1–9, 2013.

VUČIĆEVIĆ, B. et al. Assessing the sustainability of the energy use of residential buildings in Belgrade through multi-criteria analysis. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 51–61, 2014.

WANG, L.; GWILLIAM, J.; JONES, P. Case study of zero energy house design in UK. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1215–1222, nov. 2009.

WANG, N.; CHANG, Y.-C.; NUNN, C. Lifecycle assessment for sustainable design options of a commercial building in Shanghai. **Building and Environment**, v. 45, n. 6, p. 1415–1421, 2010.

WHITEHEAD, B. et al. Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. **Building and Environment**, v. 82, p. 151–159, 2014.

WILLIAMS, D. et al. Climate change influence on building lifecycle greenhouse gas emissions: Case study of a UK mixed-use development. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 112–126, maio 2012.

YAO, J. A Multi-Objective (Energy, Economic and Environmental

Performance) Life Cycle Analysis for Better Building Design. **Sustainability**, v. 6, n. 2, p. 602–614, 2014.

ZHANG, Y. **“Parallel” energyplus and the development of a parametric Institute of Energy and Sustainable Development**. De Montfort University , Leicester , UK. p. 1382–1388, 2009.

ZHANG, Y.; KOROLJIA, I. **Performing complex parametric simulations with jEPlus**. SET2010 9th. International Conference on Sustainable. **Anais...**, Shanghai: 2010.

APÊNDICE A. PESQUISAS BRASILEIRAS DE ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES, MATERIAIS OU COMPONENTES

Tabela 56 – Levantamento de pesquisas brasileiras que fornecem dados de conteúdo energético ou emissões de CO₂ dos principais materiais de construção

AUTOR	DADOS	OBSERVAÇÃO
Gomes e Silva (2015)	Energia incorporada CO ₂ e CO ₂ eq incorporado	Dados de alguns materiais de construção obtidos por meio de ajuste à matriz brasileira na base de dados do Ecoinvent usando o programa SimaPro.
Habib (2014)	Energia incorporada CO ₂ incorporado	Fornecer dados de energia e emissões de CO ₂ incorporados para o isolante lã de rocha.
Garcia (2014)	Energia incorporada CO ₂ incorporado	Estudo sobre produção de madeira no Brasil. Obtém dados sobre a produção de madeira nativa e plantada. Estudo com dados primários.
Silva (2013b)	Energia incorporada emissões de CO ₂	Compilou dados de autores internacionais e nacionais, outros com base em dados gerais do Brasil e alguns com fornecedores com abordagem simplificada.
Costa (2012)	CO ₂ incorporado	Estabeleceu um método para quantificação de emissões de CO ₂ geradas na produção dos materiais de construção mais utilizados no Brasil. O método mostra três níveis de precisão.
Souza (2012)	CO ₂ incorporado	Fornecer dados de emissões de CO ₂ de materiais associados à produção de concreto.
Nabut Neto (2011)	Energia e CO ₂ incorporado	Energia incorporada e emissões de CO ₂ de fachadas <i>steel frame</i> para Brasília. Dados secundários de energia incorporada.
Bessa (2010)	ACV	Analisa três sistemas de fachadas para edifícios comerciais. Foco nas emissões de CO ₂ .
Lima (2010)	CO ₂ incorporado	Estimou dados nacionais para a produção de concreto, cimento e agregados.
Rosa (2010)	Energia incorporada	Estudo comparativo entre a produção de blocos de concreto e blocos cerâmicos fornecendo dados de energia incorporada dos materiais associados.
Sattler, Kuhn e Souza (2009)	Energia incorporada	Estudo em cinco sistemas construtivos de paredes, considerando um segmento linear de 1 metro de largura de paredes externas. Compararam paredes construídas em blocos de basalto, blocos de arenito, tijolos em cerâmica vermelha, toras de eucalipto e enxaimel. Dados de energia incorporada de outras pesquisas.

Tabela 56 (continuação)

Santos e Pereira (2008)	Energia incorporada	Avaliaram dois tipos de fachadas para edifícios comerciais: alvenaria em cerâmica e vidro com estrutura de alumínio.
Taborianski, Simoni e Prado (2008)	Energia incorporada	Elaboração de inventário de consumo de energia no ciclo de vida dos materiais utilizados em fachadas de edifícios no Brasil.
Tavares (2006)	Energia incorporada	Metodologia para avaliação do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. Dados de conteúdo energético de materiais com base em análise <i>input-output</i> e alguns em médias de valores de pesquisas nacionais e internacionais.
Stachera (2006)	CO ₂ incorporado	Analisa a construção de habitações de interesse social do Paraná considerando dados de emissões de CO ₂ dos principais materiais de construção.
Borges (2004)	Energia incorporada	Dados de PVC com levantamentos locais e dados secundários. Informações do berço ao portão.
Tavares e Lamberts (2004)	Energia incorporada	Estudos comparativos sobre consumo energético no ciclo de vida de edificações residenciais do Brasil, Austrália e Suécia. Apresenta dados de cerâmica vermelha e de revestimento.
Pereira (2004)	ACV	Produção de pisos cerâmicos em duas empresas de Santa Catarina.
Soares e Pereira (2004)	ACV	Avaliaram os impactos na produção de pisos e tijolos cerâmicos de duas empresas de Santa Catarina (SC). Analisaram dois fabricantes de cada material.
Soares, Souza e Pereira (2006)		
Ribeiro (2003)	ACV	Inventário do ciclo de vida da geração hidroeétrica no Brasil. Dados de consumo energéticos próprios e base em outros estudos.
Manfredini (2003)	Energia incorporada	Fornecer dados de energia incorporada para cerâmica vermelha com base em levantamentos de indústrias de RS.
Taborianski (2002)	ACV	Consumo de energia de sistemas de aquecimento de água: elétrico, solar e gás, considerando a fase de produção e vinte anos de utilização dos equipamentos.
Mastella (2002)	ACV	Comparação entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. Considerou duas empresas de blocos cerâmicos e uma de concreto em SC.


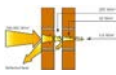







Tabela 56 (continuação)

Carvalho, 2002	ACV	Análise do ciclo de vida de cimento Portland: CP I, CP II, CP III e CPIV.
Grigoletti, (2001)	ACV	Caracterização de impactos ambientais da indústria de cerâmica vermelha no RS (tijolos, blocos e telhas cerâmica). Foram pesquisadas oito indústrias. Sem muitos dados quantitativos.
Sperb (2000)	ACV	Verificou impactos ambientais dos materiais utilizados em paredes e coberturas de diferentes tipos habitacionais. Trabalhou com dados de outras fontes, principalmente em Guimarães (1985).
Pietrobon et al. (1985) apud Tavares (2006)	Energia incorporada	Analisou a energia incorporada em edificações residenciais previstas na norma NBR 12721. Usou dados do CETEC-MG (1982).
Guimarães (1985) apud Tavares (2006)	Energia incorporada	Analisou uma edificação residencial unifamiliar de interesse social. Alguns dados são próprios e outros com base em pesquisas anteriores.
Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	Energia incorporada	Principais insumos para construção de edifícios no Brasil.
IPT (1982) apud Tavares (2006)	Energia incorporada	Levantamento dos conteúdos energéticos de materiais de construção para São Paulo para o BNH.
Fundação Centro Tecnológico de MG, MIC-CETEC (1982) apud Tavares (2006)	Energia incorporada	Avaliou o conteúdo energético de três edificações: comercial, pública e residencial. Principais insumos para construção de edifícios em Minas Gerais.

Nota: Dados de Pietrobon et al. (1985), Gonçalves (1985), IPT (1982) e Fundação Centro Tecnológico de MG (1982) apud Tavares (2006). Dados de dados de Guimarães (1985) apud Sperb (2000) Tavares (2006).

Fonte: Elaboração da autora, com base em fontes diretas dos autores assim como de Tavares (2006), Kuhn (2006) e Sperb (2000).









APÊNDICE B. MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PROJETOS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL. NÍVEL DE RENDA 1. 33

Medidas de eficiência energética para adaptação às mudanças climáticas				Avaliação qualitativa						
Nº	Medida	Descrição	Imagem	Benefícios potenciais na operação			Desafios			
				Redução de energia operacional	Redução de emissões de CO ₂	Aumento do conforto	Econômico (custo)	Energia incorporada	Mudanças no projeto	
MDT: Melhoria do desempenho térmico da envoltória	1	Paredes com absorvância solar baixa	Paredes externas com acabamentos de baixa absorvância solar		[Alto] Redução da temperatura interna	[Alto] Redução na necessidade de AVAC	[Alto] [Resf.]	[Baixo] inicial/ [Médio] operação	Nenhuma	Nenhuma
	2	Paredes com transmitância térmica baixa: (com alta capacidade térmica)	Especificação de paredes com maior capacidade térmica (com ou sem isolamento)		[Médio] Redução da temperatura interna	[Médio]	Médio [Resf.] [Aquec.]	[Alto] inicial/ [Baixo] operação	[Alto]/ [Médio] Depende do material	Mudanças na área
	3	Paredes com transmitância térmica baixa: (com baixa capacidade térmica)	Especificação de paredes com baixa capacidade térmica (com isolamento)		[Médio] Redução da temperatura interna	[Médio]	Médio [Resf.] [Aquec.]	[Alto] inicial/ [Baixo] operação	[Médio]/ [Baixo] Depende do material	Depende do material
	4	Isolamento na cobertura	Uso de isolamento ou barreiras radiantes na cobertura		[Alto] Redução da temperatura interna	[Alto] Redução na necessidade de AVAC	[Alto] [Resf.] [Aquec.]	[Médio] inicial/ [Baixo] operação	[Médio]	Nenhuma relevante
	5	Cobertura com absorvância solar baixa	Materiais com baixa absorvância solar		[Alto] Contenção da radiação solar	[Alto] Redução na necessidade de AVAC	[Alto] [Resf.]	[Baixo] inicial para telha cerâmica [Médio] inicial para outros tipos de cobertura/ [Médio] operação	[Médio] ou [Alto] para cobertura metálica	Mudanças dependem da estrutura do telhado
	6	Aumento do pé direito	Pé direito alto		[Baixo] Estratificação da temperatura interna	[Baixo]	[Baixo] [Resf.]	[Médio]/ [Alto] inicial /[Baixo] operação	[Médio]	Nenhuma relevante
	7	Melhoria nos vidros	Especificação de vidros seletivos/ avançados		[Médio] Contenção da radiação solar	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	Médio [Resf.] [Aquec.]	[Alto] inicial/ [Baixo] operação	[Médio] /[Alto]	Nenhuma relevante
	8	Otimização da orientação solar	Locação dos ambientes de permanência prolongada e esquadrias com adequada orientação solar		[Alto] Contenção e aproveitamento da radiação solar	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	[Alto] [Resf.] [Aquec.]	Nenhum	Nenhum	Precisa análise detalhada do local e condicionantes climáticas
	9	Fachada dupla	Componentes da construção em camadas		[Alto] Melhora da temperatura interna	[Alto] Redução na necessidade de AVAC	[Alto] [Resf.] [Aquec.]	[Alto] inicial/ [Alto] operação	[Alto]	Grandes mudanças







Apêndice B. (continuação)

Medidas de eficiência energética para adaptação às mudanças climáticas					Avaliação qualitativa					
					Benefícios potenciais na operação			Desafios		
	Nº	Medida	Descrição	Imagem	Redução de energia operacional	Redução de emissões de CO ₂	Aumento do conforto	Econômico (custo)	Energia incorporada	Mudanças no projeto
MDT: Redução da radiação direta no Verão	10	Aberturas com sombreamento nos dormitórios	Uso de veneziana nas janelas dos dormitórios		[Alta] Contenção de radiação solar/ Redução da temperatura interna / Redução da necessidade de AVAC	[Alta] Redução na necessidade de AVAC e no consumo de energia	[Alto] (Resf.)/ [Médio] (Aquec.)	[Médio] inicial/ [Alto] inicial/ [Baixo] operação	[Alto]	Nenhuma relevante
	11	Aberturas com sombreamento em todos os ambientes de permanência prolongada	Venezianas em todas as janelas de ambientes de permanência prolongada		[Alto] Contenção da radiação solar/ Redução da temperatura interna / Redução na necessidade de AVAC	[Médio]	[Médio] [Resf.]	[Alto] inicial/ [Baixo] operação	[Médio]	Precisa mudanças estruturais
	12	Sacada para apartamentos/ casas não térreas	Sacadas nas janelas		[Alto] Permite aumento da ventilação natural quando necessário	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	Médio [Resf.]	[Alto]	[Médio]	Nenhuma relevante
MDT: Aumento da ventilação	13	Aumento do fator de ventilação	Esquadrias/janelas com maior área de abertura (fator de ventilação de 90%)		[Médio] Permite maior ventilação natural quando necessário	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	Médio [Resf.]	[Médio]	[Baixo]	Nenhuma relevante
	14	Aumento no tamanho das esquadrias/janelas	Aumento das janelas para atingir o requerimento mínimo da NBR 15575 ou da Etiqueta de Energia		[Alto] Aumento da ventilação natural com baixo consumo de energia	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	[Alto] [Resf.]	[Alto]	[Médio]	Nenhuma relevante
	15	Aumento maior do tamanho da janela	Aumento das janelas para atingir 20% acima do requerimento mínimo da NBR 15575		[Médio] Permite maior ventilação natural quando necessário	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	Médio [Resf.]	[Alto]	[Médio]	Nenhuma relevante
	16	Aumento da ventilação mecânica	Instalação de ventiladores de teto		[Alto] Aumento da ventilação natural com baixo consumo de energia	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	[Alto] [Resf.]	[Baixo] inicial/ [Baixo] operação	[Baixa] [Médio]	Nenhuma
	17	Ventilação noturna	Especificação de esquadrias que permitam ventilação noturna com segurança		[Médio] Permite maior ventilação natural quando necessário	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	Médio [Resf.]	[Médio] inicial/ [Baixo] operação	[Médio]	Esquadrias mais detalhadas
MDT: Redução do efeito de ilha de calor	18	Espaço verde	Disponibilidade de área verde dentro da unidade		[Alto] Melhora da temperatura interna	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	[Alto]/ [Baixo] Depende da localização	[Alto] inicial/ [Alto] operação	[Médio] Depende do material	Grandes mudanças
	19	Paredes verdes	Fornecimento de parede verde nas fachadas com alta incidência solar		[Alto] Melhora da temperatura interna	[Médio] Redução na necessidade de AVAC	[Médio]/ [Baixo] Depende da localização	[Alto] inicial/ [Alto] operação	[Baixo]	Consideração da espessura da parede

Apêndice B. (continuação)

Medidas de eficiência energética para adaptação às mudanças climáticas					Avaliação qualitativa					
					Benefícios potenciais na operação			Desafios		
	Nº	Medida	Descrição	Imagem	Redução de energia operacional	Redução de emissões de CO ₂	Aumento do conforto	Econômico (custo)	Energia incorporada	Mudanças no projeto
MDT: Redução do efeito de ilha de calor	20	Teto vegetado	Cobertura com vegetação não utilizada como ambiente de estar		[Alto] Contenção da radiação solar	[Médio] Redução na necessidade de AVAC [Ref.] [Aquec.]	[Alto] [Resf.] [Aquec.]	[Alto] inicial/ [Médio] operação	[Alto] / [Médio] Depende das necessidades para a estrutura do telhado por conta do peso da cobertura	Mudanças necessárias na estrutura da cobertura dependendo do seu peso
	21	Teto jardim	Cobertura com vegetação usada como espaço de permanência		[Alto] Contenção da radiação solar	[Médio] Redução na necessidade de AVAC [Ref.] [Aquec.]	[Alto] [Resf.] [Aquec.]	[Alto] inicial/ [Alto] operação	[Alto] / Por conta da necessidade da estrutura	Mudanças necessárias no projeto por conta do peso da estrutura e da cobertura
Redução no consumo de energias: fontes alternativas de energia	22	Uso de energia solar fotovoltaica	Painéis solares fotovoltaicos conectados à rede instalados na cobertura		[Alto] Consumo de energia renovável	[Alto] Tecnologia com baixa ou zero emissão de carbono na operação		[Alto] inicial/ [Baixo] operação	[Alto]	Mudanças podem ser necessárias para integração correta com a inclinação do telhado. Espaço necessário para inversores
	23	Aquecimento solar de água	Instalação de sistema de aquecimento de água na cobertura		[Alto] Redução no consumo de energia	[Alto] Tecnologia com baixa ou zero emissão de carbono na operação	Nenhum	[Médio] para casas [Baixo] operação – [Alto] para multifamílias [Alto] operação	[Médio]	Grandes mudanças podem ser necessárias para adaptação do boiler dentro da casa. A integração com a inclinação do telhado depende da correta orientação
	24	Aquecimento de água a gás	Instalação de equipamentos com selo Conpet para aquecimento de água a gás. Para edificações multifamiliares		[Baixo] Redução no consumo de energia elétrica, no lugar dele consumo de gás	[Baixo] Altas emissões para gás	Nenhum	[Médio] inicial/ [Baixo] operação	[Alto] [Médio]	Consideração de espaço para acomodar equipamentos de gás
	25	Diversificação da matriz	Simulação de diferentes matrizes energéticas no país		[Baixo] O consumo é o mesmo	[Alto] Tecnologia com baixa ou zero emissão de carbono na operação	Nenhum	[Alto] inicial/ [Médio] operação	[Médio]	Nenhuma
	26	Iluminação eficiente	Uso de lâmpadas com baixo consumo		[Alto] Redução no consumo de energia	[Alto]/ [Médio] Redução no consumo energético	Nenhum	[Médio] inicial/ [Baixo] operação		Nenhuma
Redução no consumo de energia: equipamentos	27	Equipamentos eficientes: geladeira	Entrega de geladeira com selo Procel		[Alto] Redução no consumo de energia	[Alto] Redução no consumo energético	Nenhum	[Médio] inicial/ [Baixo] operação		Nenhuma

Apêndice B. (continuação)

Medidas de eficiência energética para adaptação às mudanças climáticas					Avaliação qualitativa					
					Benefícios potenciais na operação			Desafios		
	Nº	Medida	Descrição	Imagem	Redução de energia operacional	Redução de emissões de CO ₂	Aumento do conforto	Econômico (custo)	Energia incorporada	Mudanças no projeto
Redução no consumo de energia: equipamentos	28	Equipamentos eficientes: outros equipamentos	Entrega de outros equipamentos com selo Procel e fogão com selo Conpet		[Médio] Redução no consumo de energia	[Médio]	Nenhum	[Médio] inicial/ [Baixo] operação		Nenhuma
	29	Uso de medidores nas unidades habitacionais	Uso de medidores de energia remota nas unidades		[Alto] /educação aos usuários	[Alto] Potencial por grande economia de energia	Nenhum	[Médio] inicial/ [Médio] operação		Nenhuma
Flexibilidade	30	Flexibilidade no desenho do projeto	Projeto com flexibilidade para ampliação		[Baixo] Pode levar a maior consumo energético se usado AVAC	[Baixo] Pode levar a maior consumo energético se usado AVAC	[Médio]/ [Alto] Depende do projeto	[Médio] inicial/ [Médio] operação	[Médio]/ [Alto]	Devem ser consideradas mudanças maiores
	31	Aumento do tamanho dos ambientes	Aumento nas dimensões da unidade habitacional		[Baixo] Pode levar a maior consumo energético se usado AVAC	[Baixo] Pode levar a maior consumo energético se usado AVAC	[Médio]/ [Alto] Depende do projeto	[Médio] inicial/ [Baixo] operação	[Médio]/ [Alto]	Mudanças na área
Condicionamento artificial	32	Condicionamento artificial	Fornecer unidades de condicionamento do ar com selo Procel		Nenhum- Alto consumo energético	Nenhum	[Alto] [Resf.] [Aquec.]	[Médio] inicial/ [Alto] operação	[Alto]	Para <i>split</i> espaço externo para equipamentos
Risco de inundação	33	Nível mínimo de piso 0,60 m	Unidade 0,60m acima do terreno em locais que possam ter problemas futuros de inundação		Nenhum- Contato com o solo melhora o desempenho na tipologia de casa	Nenhum	Nenhum	[Alto] inicial/ [Médio] operação	[Médio]	Grandes mudanças

Notas: 1.MDT: Melhoria do desempenho térmico.

2. Resf = Resfriamento.

3. Aquec. = Aquecimento.

4. Ref. = Refrigeração

APÊNDICE C. IDENTIFICAÇÃO DOS CASOS DAS SIMULAÇÕES EM CONJUNTO E VARIÁVEIS PARA SÃO PAULO

Caso Nº	α	PAR	COB	FOR	ESQ.	FV	A. ESQ	Caso Nº	α	PAR	COB	FOR	ESQ.	FV	A. ESQ
Caso base	0,6	PAR0	COB0	FOR0	ESQ0	0,45	2,1	144	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
0	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,1	145	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
1	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,3	146	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
2	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,1	147	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
3	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,3	148	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
4	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,1	149	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
5	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,3	150	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
6	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,1	151	0,6	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
7	0,3	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,3	152	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,1
8	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	153	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
9	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	154	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,1
10	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	155	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
11	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	156	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,1
12	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	157	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
13	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	158	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,1
14	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	159	0,6	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
15	0,3	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	160	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
16	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,1	161	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
17	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	162	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
18	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,1	163	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
19	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	164	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
20	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,1	165	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
21	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	166	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
22	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,1	167	0,6	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
23	0,3	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3	168	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,1
24	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,1	169	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
25	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,3	170	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,1
26	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,1	171	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
27	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,3	172	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,1
28	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,1	173	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
29	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,3	174	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,1
30	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,1	175	0,6	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
31	0,3	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,3	176	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
32	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	177	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
33	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	178	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
34	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	179	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
35	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	180	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
36	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	181	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
37	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	182	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
38	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	183	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
39	0,3	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	184	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
40	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,1	185	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
41	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	186	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
42	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,1	187	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
43	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	188	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
44	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,1	189	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
45	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	190	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
46	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,1	191	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
47	0,3	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3	192	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,1
48	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	193	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,3
49	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	194	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,1
50	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	195	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,3
51	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	196	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,1
52	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	197	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,3
53	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	198	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,1
54	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	199	0,3	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,3
55	0,3	PAR1	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	200	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
56	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,1	201	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
57	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	202	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
58	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,1	203	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
59	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	204	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
60	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,1	205	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
61	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	206	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
62	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,1	207	0,3	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
63	0,3	PAR1	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3	208	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,1
64	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	209	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
65	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	210	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,1
66	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	211	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
67	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	212	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,1
68	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	213	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
69	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	214	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,1
70	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	215	0,3	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
71	0,3	PAR1	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	216	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,1
72	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,1	217	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,3
73	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	218	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,1
74	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,1	219	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,3

Apêndice C (continuação)

Caso Nº	α	PAR	COB	FOR	ESQ.	FV	A. ESQ	Caso No.	α	PAR	COB	FOR	ESQ.	FV	A. ESQ
75	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	220	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,1
76	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,1	221	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,3
77	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	222	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,1
78	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,1	223	0,3	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,3
79	0,3	PAR1	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3	224	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
80	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	225	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
81	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	226	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
82	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	227	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
83	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	228	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
84	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	229	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
85	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	230	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
86	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	231	0,3	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
87	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	232	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,1
88	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	233	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
89	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	234	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,1
90	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	235	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
91	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	236	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,1
92	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	237	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
93	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	238	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,1
94	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	239	0,3	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
95	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	240	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,1
96	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,1	241	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,3
97	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,3	242	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,1
98	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,1	243	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,3
99	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,3	244	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,1
100	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,1	245	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,3
101	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,3	246	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,1
102	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,1	247	0,6	PAR8	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,3
103	0,6	PAR3	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,3	248	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
104	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	249	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
105	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	250	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
106	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	251	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
107	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	252	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
108	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	253	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
109	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	254	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
110	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	255	0,6	PAR8	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
111	0,6	PAR3	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	256	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,1
112	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,1	257	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
113	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	258	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,1
114	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,1	259	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
115	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	260	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,1
116	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,1	261	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
117	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	262	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,1
118	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,1	263	0,6	PAR8	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
119	0,6	PAR3	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3	264	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,1
120	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,1	265	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,3
121	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,3	266	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,1
122	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,1	267	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,3
123	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,3	268	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,1
124	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,1	269	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,3
125	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,3	270	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,1
126	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,1	271	0,6	PAR8	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,3
127	0,6	PAR3	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,3	272	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1
128	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,1	273	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
129	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	274	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1
130	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,1	275	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
131	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	276	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1
132	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,1	277	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
133	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	278	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1
134	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,1	279	0,6	PAR8	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
135	0,6	PAR3	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	280	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,1
136	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,1	281	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
137	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	282	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,1
138	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,1	283	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
139	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	284	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,1
140	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,1	285	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
141	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	286	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,1
142	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,1	287	0,6	PAR8	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
143	0,6	PAR3	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3								

Notas: ABS= Absortância solar das paredes externas; COB = Cobertura; FOR = Forro; ESQ. = Tipo de esquadria; FV= Fator de ventilação das esquadrias; A.ESQ = Altura da verga das janelas. Considera-se que no caso base as janelas estão a 2,10 m de altura com relação ao piso.

APÊNDICE D. IDENTIFICAÇÃO DOS CASOS DAS SIMULAÇÕES EM CONJUNTO E VARIÁVEIS PARA SALVADOR

Caso Nº	ABS	PAR	COB	FOR	ESQ.	FV	A.ESQ	Caso No.	ABS	PAR	COB	FOR	ESQ.	FV	A. ESQ
caso base	0,6	PAR0	COB0	FOR0	ESQ0	0,45	2,3	24	0,6	PAR2	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,3
0	0,3	PAR2	COB6	FOR0	ESQ2	0,45	2,3	25	0,6	PAR2	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,3
1	0,3	PAR2	COB6	FOR0	ESQ2	0,9	2,3	26	0,6	PAR2	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,3
2	0,3	PAR2	COB6	FOR0	ESQ1	0,45	2,3	27	0,6	PAR2	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,3
3	0,3	PAR2	COB6	FOR0	ESQ1	0,9	2,3	28	0,6	PAR2	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
4	0,3	PAR2	COB6	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	29	0,6	PAR2	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
5	0,3	PAR2	COB6	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	30	0,6	PAR2	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
6	0,3	PAR2	COB6	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	31	0,6	PAR2	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
7	0,3	PAR2	COB6	FOR2	ESQ1	0,9	2,3	32	0,6	PAR2	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,3
8	0,3	PAR2	COB10	FOR0	ESQ2	0,45	2,3	33	0,6	PAR2	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,3
9	0,3	PAR2	COB10	FOR0	ESQ2	0,9	2,3	34	0,6	PAR2	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,3
10	0,3	PAR2	COB10	FOR0	ESQ1	0,45	2,3	35	0,6	PAR2	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,3
11	0,3	PAR2	COB10	FOR0	ESQ1	0,9	2,3	36	0,6	PAR2	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3
12	0,3	PAR2	COB10	FOR2	ESQ2	0,45	2,3	37	0,6	PAR2	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3
13	0,3	PAR2	COB10	FOR2	ESQ2	0,9	2,3	38	0,6	PAR2	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3
14	0,3	PAR2	COB10	FOR2	ESQ1	0,45	2,3	39	0,6	PAR2	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3
15	0,3	PAR2	COB10	FOR2	ESQ1	0,9	2,3	40	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
16	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	41	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
17	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	42	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
18	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	43	0,6	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
19	0,3	PAR5	COB6	FOR1	ESQ1	0,9	2,3	44	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3
20	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,45	2,3	45	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3
21	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ2	0,9	2,3	46	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3
22	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,45	2,3	47	0,6	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3
23	0,3	PAR5	COB10	FOR1	ESQ1	0,9	2,3								

Notas: ABS= Absortância solar das paredes externas; COB = Cobertura; FOR = Forro; ESQ. = Tipo de esquadria; FV= Fator de ventilação das esquadrias; A.ESQ = Altura da verga das janelas. Considera-se que no caso base as janelas estão a 2,10 m de altura com relação ao piso.

APÊNDICE E - CONSIDERAÇÕES DE QUANTITATIVO DE MATERIAIS DO CASO BASE EM SÃO PAULO E SALVADOR PARA ABORDAGEM INTEGRADA

Algumas considerações foram necessárias para o levantamento do quantitativo de materiais do caso base, que são colocadas a seguir, com indicação da fonte de referência.

A estrutura da habitação é considerada sendo, composta por vergas sobre as janelas e portas, com contravergas sob as janelas, ambas de 9x10cm (larg.xalt.), com sobrepasse na média de 20 cm nas laterais. Para a cinta de amarração observou-se nos projetos das companhias de habitação tanto o uso de concreto in loco, quanto de canaletas de bloco preenchidas com concreto. Assim, adotou-se concreto in loco sobre todas as paredes, sendo de 9x19cm (larg.xalt.). Também foi considerado o uso de pilaretes nos cantos das paredes, sendo de 9x9 cm. Toda a estrutura é em concreto.

As paredes são de bloco cerâmico de seis furos com dimensões 9x14x19 cm (PARO). Todos os valores aqui citados foram assumidos como sendo sem desperdício e sempre privilegiando valores do SINAPI. Com base no SINAPI (código 87500 no catálogo de composições) e em fornecedores foi assumido 33 tijolos por m². Para o volume de argamassa de assentamento do tijolo desta parede, foi considerando 1,3 cm de argamassa na horizontal e, 1 cm na vertical com traço 1:2:8 de cimento:cal:areia; com base nos memoriais das companhias de habitação. Foi estimado⁴³ 0,01188 m³ de argamassa por m² da parede do caso base (PARO). Para o reboco das paredes e, com base novamente nos memoriais dos projetos analisados, foi considerada a composição de 0,5cm de chapisco, com traço 1:3 de cimento:areia, mais 1,5cm de reboco, com traço de 1:2:9 de cimento:cal:areia. No caso base as paredes internas e externas possuem a mesma especificação.

Para a cobertura do caso base (COB0), foi assumida a telha colonial de 44cm de comprimento, sendo 26 telhas por m² de telhado (conforme código SINAPI 84033). Para a estrutura do telhado em madeira, foram assumidos valores de referência em m³/m² da Universidade da Amazônia – UNAMA, sendo, os valores para o caibro central de 0.0065 m³, para os caibros de 0.0113m³ e, para as ripas de

⁴³ O SINAPI código 87500 mostra um consumo de 0,0106 m³ para 1 m² de parede, considerando 1cm de argamassa incluindo desperdício.

0,0038 m³, por m² de cobertura. Isto configurou um total de 0,022m³ de volume de madeira por m². Para o forro em PVC, foi considerado 1,91 kg por m², conforme pesquisa com fornecedores. O sistema de fixação para o forro foi previsto conforme composição 84091 do SINAPI, sendo, duas peças de madeira de 0,025x0,10x1 m para 1m² de forro, posicionadas a cada 50 cm.

O piso foi especificado conforme observado nos projetos das companhias de habitação. Assim, foi considerado piso em cerâmica de 1 cm; argamassa de regularização de 2 cm, com traço 1:5 de cimento:areia; contrapiso em concreto de 5cm e; colchão de brita de 3 cm; para todos os casos em ambas cidades.

As janelas e portas externas foram assumidas como sendo de alumínio. Entretanto, foi observado que caso o material fosse considerado aço, para as portas externas, os resultados nas simulações termoenergéticas seriam praticamente iguais, pois o material das esquadrias das janelas não é considerado na simulação com o Energy Plus. Dados com relação ao peso das esquadrias de alumínio foram com base na média de três fornecedores. Para tanto, considerou-se o peso do alumínio para as janelas e venezianas por m² como segue: janela de correr com 8,79 kg/m²; janela basculante com 3,21 kg/m² e janela de correr com altura maior do que um metro com 9,32 kg/m². Para os casos das janelas com veneziana considerou-se um peso de 5,01 kg/m² para a veneziana.

As portas externas em alumínio foram consideradas com um peso de 10,08 kg/m², também com base em fornecedores. A especificação das portas internas foi com base no SINAPI código 90822, sendo, porta de madeira semi-oca de 80x210 cm e espessura 3,5 cm. A espessura da chapa foi considerada de 5 mm.

Finalmente, foram consideradas as pinturas. Para as paredes externas e internas foi assumido uma demão de selador (SINAPI 88415), com 0,16 litros por demão, para 1m² de parede. Para paredes internas e teto, adotou-se pintura PVA, considerando como base a composição SINAPI 73415, sendo 0,24 l/m² de parede para 3 demãos. Esse valor é similar ao observado na TCPO. Para as paredes externas foi adotado o uso de tinta acrílica com o mesmo rendimento. Os valores das pinturas foram comparados com valores de fornecedores. Para pintura nas portas de madeira, foi considerado a composição SINAPI 73739/1, sendo pintura em esmalte acetinado, com duas demãos e rendimento de 0,16 litros por m² de superfície.

APÊNDICE F - CONSIDERAÇÕES DE QUANTITATIVO DE MATERIAIS DOS CASOS 1 A 4 PARA SÃO PAULO E SALVADOR

Para os casos 1 a 4 analisados tanto em São Paulo quanto em Salvador, a unidade funcional, vida útil da edificação, áreas, fases do ciclo de vida e dados avaliados na fase de uso, mantem-se conforme descrito no caso base. Entre os componentes/serviços, o piso e as portas também se mantêm com a mesma composição do caso base. Para os casos que usam estrutura em concreto, é mantida a mesma composição do caso base, com ajustes necessários ao tipo de parede. Quando usados, reboco, chapisco e argamassa de assentamento, os traços e espessura, se mantêm igual ao caso base. Da mesma forma que para o caso base, todos os valores aqui citados foram assumidos como sendo sem desperdício e sempre privilegiando valores do SINAPI. De forma mais específica, para a parede em alvenaria de tijolo com 15 cm de espessura total (PAR2), usada nos casos em Salvador, o cálculo para a quantidade de tijolos foi realizado com base no SINAPI⁴⁴ de tijolos por m² e, com base em fornecedores, assumindo-se 25 tijolos por m². Para o volume de argamassa de assentamento do tijolo desta parede, foi estimado 0,01238 m³ para 1m² de parede, com base no código 87498⁴⁵ do SINAPI; considerando ainda, 1,3cm de argamassa na horizontal e, 1 cm na vertical, com traço 1:2:8 de cimento:cal:areia. Para a parede com alvenaria em tijolo de 18 cm de espessura total (PAR3) tomou-se a mesma referência de número de tijolos por m² da PAR2, por conta que os tijolos tem as mesmas medidas em altura e profundidade. Para a parede dupla em madeira com isolante (PAR5) foi especificada uma parede de madeira dupla de 2,5 cm de espessura com isolante de 2,5cm de espessura. As paredes são estruturadas em montantes de 9x4 cm distantes em média 60 cm. Igualmente, possuem um montante inferior e dois superiores. Além dos montantes das paredes, foi considerada estrutura da casa em madeira. Para a estrutura em madeira foram mantidas as mesmas dimensões dos pilaretes e cinta de amarração da estrutura em concreto. Por outro lado, as vergas e contravergas foram consideradas de 9x5 cm com comprimento

⁴⁴ O código 87498 do SINAPI mostra 27,93 unidades. Ese valor inclui perda estimada em 13%.

⁴⁵ O código 87498 do SINAPI coloca um volume de argamassa de 0,0125 m³ por m². Este valor foi adaptado às espessuras de assentamento aqui consideradas para o tijolo e descontado o desperdício que inclui o valor do SINAPI.

igual às portas e janelas. A especificação da estrutura de madeira para a casa, tomou como base fornecedores e Garcia (2014). A Figura 134 mostra a estrutura em madeira para a casa quando é especificada a parede PAR5. Como forma de simplificação para o cálculo do isolamento em lã de rocha, não foi descontada a área dos montantes das paredes. Para a especificação do forro em madeira (FOR1) tomou-se como base o código SINAPI⁴⁶ 74250/1. O forro em laje com EPS (FOR2), foi especificado com base em fornecedores, considerando laje unidirecional. Isto por conta de por não estar explícito na base do SINAPI. Para tanto, foi considerada uma laje de 12 cm, sendo 4cm de concreto, 7cm de EPS⁴⁷ e 1cm de argamassa interna. Para o concreto foi especificado $0,052\text{m}^3/\text{m}^2$ de laje, com o peso da laje estimado em $142\text{kg}/\text{m}^2$. Para a telha metálica da cobertura (COB10) foi considerado 0,65 mm de espessura, e densidade de massa aparente conforme a NBR 15220-2. O peso da telha foi considerado em $5,07\text{kg}$ por m^2 de cobertura, com base em fornecedores. Finalmente com relação à pintura; para o forro de madeira, foi considerado o uso de esmalte, com rendimento igual às portas internas. Para forro de laje considerou-se o uso de tinta PVA com rendimento igual às paredes internas e, sem uso de selador. Para as paredes internas e externas adotaram-se os mesmos dados de rendimento e número demãos do caso base.

Figura 134– Estrutura em madeira para a casa que usa paredes em madeira (PAR5)



⁴⁶ Inclui desperdício de 10%. Portanto, foi adotado esse valor para desperdício do forro em madeira.

⁴⁷ O SINAPI adota 5% para o desperdício do EPS e do isolante em lã de vidro. Por outro lado, a TCPO assume 15% de perda do EPS. A base do SINAPI não mostrou isolante em lã de rocha. Contudo, foi assumido o valor do desperdício para EPS e lã de rocha em 5% considerando-se a referência do SINAPI.

APÊNDICE G. DISTÂNCIAS DE FABRICANTES DE MATERIAIS CONSIDERADOS NAS ANÁLISES

G.1 Distância representativa de fabricantes de materiais para São Paulo

Fabricantes São Paulo							
Material	1		2		3		Mediana (km)
	Nome	(km)	Nome	(km)	Nome	(km)	
alumínio	Sazasaki	463	Udinese	24	Sapa Aluminium Brasil	100	100
areia	AB Areias	173	EMBU	40	Polimix Agregados	37	40
brita	AB Areias	173	EMBU	40	Polimix Agregados	37	40
cal_hidratada	Votorantim Cimentos	102	Cal Morro Branco	448	Cobrascal	38	102
cerâmica_piso	Cerâmica Incefra	162	Gail	15	Cerâmica Porto Ferreira	226	162
cerâmica_telha	Cerâmica Aldebarã	101	Top telhas Maristela Telhas	186	Faulim	151	151
cerâmica_tijolo	Cerâmica auxiliadora	77	Cerâmica City Ltda	147	Alpha Blocos	57	77
cimento	Cimento Tupi S.A	435	Votorantim Cimentos	102	Intercement	67	102
concreto	Supermix	36	FLEXMI X	42	Intercement	67	42
madeira estrutura	Embra	21	Eco Madeiras	110	14bis Madeiras	37	37
madeira portas	Germano Madeira	31	Madeira Sete Folhas	22	Eucatex	238	31
PVC	Tecnoperfil Plásticos	56	Majestic	25	Duro PVC Ltda	888	56
reboco argamassa chapisco	Argamais	43	Massareti	135	Sika	19	43

Apêndice G.1 (continuação)

Fabricantes São Paulo							
Material	1		2		3		Mediana (km)
	Nome	(km)	Nome	(km)	Nome	(km)	
tinta acrílica	Sherwim Williams	25	Suvinil	28	Solventex	36	28
tinta esmalte	Sherwim Williams	25	Suvinil	28	Solventex	36	28
tinta PVA látex	Sherwim Williams	25	Suvinil	28	Solventex	36	28
selador	Sherwim Williams	25	Suvinil	28	Solventex	36	28
vidro	Glassec Viracon	83	Guardian	136	Vitron Glass Design	19	83
madeira paredes	14bis Madeiras	44	Eco Madeiras	112	LP Building Products	527	112
isolante lã de rocha	Rockfibras	81	Grupo Heme Isolantes	38	Vibrac System	23	38
telha metálica	Dânica Zipco	652	Kofar	31	Galvanoaço	22	31
estrutura metálica	IsaAço	43	Kofar	33	Dagnese Soluções Metálicas	975	43
madeira forro	Zanchet	23	Madeira Sete Folhas	22	Eucatex	239	23
EPS	ISOEP	99	Styropak	29	EcoEPS	280	99
argamassa	Argamais	43	Massareti	138	Sika	25	43
ATERRO	Revita engenharia Itaquareia	39,5	Riuma mineração Ltda	33,1	UVR grajaú	36,2	36,2

Nota:

1. As distâncias representam uma estimativa para a cidade de São Paulo pois não foi considerado um terreno real.
2. Aterros de São Paulo com base em:
<<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/amlurb/att/index.php?p=4632>>

G.2. Distância representativa de fabricantes de materiais para Salvador

Fabricantes Salvador							
Material	1		2		3		Mediana (km)
	Nome	(km)	Nome	(km)	Nome	(km)	
alumínio	Sazasaki	2.060	Udinese	1.986	Gravia Ind. Perfila-dos Aço	1.487	1.986
areia	Polimix Agregados	613	Brasmic, Minera-ção,	1.415	Ottomar Minera-ção*	74	613
brita	Polimix Agregados	613	Pedreira civil*	27	Pedreira Carangi *	39	39
cal_ hidratada	ICAL	1.372	Votoran-tim	1.462	Cal Trevo*	360	1.372
cerâmica_ piso	Incenor Revestimen-tos cerâmicos	54	Tecnogres Revesti-mentos cerâmicos	48	Cerâmi-ca Elizab-eth	912	54
cerâmica_ telha	Cerâmica União	783	Cerâmica Simona-ssi*	151	Cerâmi-ca Santana *	154	154
cerâmica_ tijolo	Cerâmica GGP	1.534	Cerâmica Bonfim*	40	Cerâmi-ca Poty*	60	60
cimento	Cimento Lafarge*	63	Cimento Votoran-tim*	350	Cimento Naciona l	1.343	350
concreto	Brasmix	1.622	Votoran-tim	9	Concre-to REDE-MIX	49	49
madeira estrutura	Agronelli Madeiras	1.651	Agrone-lli Madeiras	1.652	Incoes-ma	1.682	1.652
madeira portas	Serraria Rocha	715	Maderei-ra Sete Folhas	1.971	Eucatex	2.037	1.971
PVC	Araforros	587	Maxplast *	196	Eplast Nordes-te	749	587
reboco argamassa	Argamassa Vitória	517	Votoran-tim Camaça-ri, BA	48	Argama-ssa Futura	63	63
tinta acrílica	Suvinil	794	Tintas Killing	30	Tintas Verano	30	30

Apêndice G.2 (continuação)

Fabricantes Salvador (continuação)							
Material	1		2		3		Mediana (km)
	Nome	(km)	Nome	(km)	Nome	(km)	
tinta esmalte	Suvinil	794	Tintas Killing	30	Tintas Verano	30	30
tinta PVA látex	Suvinil	794	Tintas Killing	30	Tintas Verano	30	30
selador	Suvinil	794	Tintas Killing	30	Tintas Verano	30	30
vidro	Guardian	1.160	Vivix Vidros Planos*	875	Cebrace	1.876	1.160
madeira paredes	Agronelli Madeiras	1.651	Eco Madeiras	1.970	LP Building Products	2.402	1.970
isolante lâ de rocha	Rockfibras	1.991	Grupo Heme Isolantes	2.018	Vibrac System	1.986	1.991
telha metálica	Dânica Zipco	791	Kofar	1.992			791
estrutura metálica	IsaAço	2.005	Kofar	1.992	Dagnese Soluções Metál.	2.941	2.005
madeira forro	Zanchet	1.995	Madereira Sete Folhas	1.971	Agronelli Madeiras	1.652	1.971
EPS	ISOESTE	784	ISOEP	1.954	EcoEPS	1.845	1.845
argamassa	Argamassa Vitória	527	Votorantim. Dias d'Ávila – Camaçari, BA	48	Argamassa Futura	63	63
ATERRO	Aterro Metropolitan Centro	27,3					27,3

Notas:

1. As distâncias representam uma estimativa para a cidade de Salvador pois não foi considerado um terreno real.

2. * Refere-se a fornecedores dados pelo Sinduscon de Salvador, Bahia.

APÊNDICE H. DADOS DE MATERIAIS

H.1 Dados de vida útil de projeto usados na pesquisa. Base na 15575-1.

Sistema	Vida útil de projeto (VUP) adotada na pesquisa em anos	Dados da NBR 15575-1	
		Vida útil de projeto mínima em anos	Vida útil de projeto superior em anos
EDIFÍCIO	50	≥ 50	≥ 75
ESTRUTURA (pilares, vigas, laje e outros)	50	≥ 50	≥ 75
PAREDES EXTERNAS (inclui painéis de fachada)	40	≥ 40	≥ 60
PAREDES INTERNAS	20	≥ 20	≥ 30
REVESTIMENTO DE FACHADA (aderido e não aderido)	25	≥ 20	≥ 30
COBERTURA-TELHAMENTO	20	≥ 13	≥ 20
COBERTURA-FORRO	20	≥ 13	≥ 20
COBERTURA: ESTRUTURA	30	≥ 20	≥ 30
REVESTIMENTO DE TETO INTERNO ADERIDO (argamassa, gesso)	17	≥ 13	≥ 20
REVESTIMENTO PISO INTERNO ADERIDO: (cerâmico, pétreos, tacos, assoalhos e sintéticos)	17	≥ 13	≥ 20
REVESTIMENTO PISO INTERNO NÃO ADERIDO: (laminados ou elevados, lambris)	10	≥ 8	≥ 12
LAJE DE PISO	50	≥ 50	≥ 75
JANELAS (componentes fixos e móveis)	30	≥ 20	≥ 30
BRISES NAS JANELAS (venezianas)	30	≥ 20	≥ 30
PORTAS EXTERNAS	30	≥ 20	≥ 30
PORTAS INTERNAS	20	≥ 12	≥ 20
PINTURA SELADOR (paredes externas)	40	≥ 40	≥ 60
PINTURA SELADOR (paredes internas)	20	≥ 20	≥ 30

Apêndice H.1 (continuação)

Sistema	Vida útil de projeto (VUP) adotada na pesquisa em anos	Dados da NBR 15575-1	
		Vida útil de projeto mínima em anos	Vida útil de projeto superior em anos
PINTURA SELADOR (teto forro)	20	≥ 13	≥ 20
PINTURA PAREDES EXTERNAS (pinturas e revestimentos sintéticos texturizados)	7	≥ 8	≥ 12
PINTURA PAREDES INTERNAS	5	≥ 4	≥ 8
PINTURA TETO FORRO	5	≥ 4	≥ 8
PINTURA JANELAS EXTERNAS	7	≥ 8	≥ 12
PINTURA PORTAS INTERNAS	5	≥ 4	≥ 8

Notas:

1. A vida útil de projeto foi considerada com base na Tabela 14.1, Tabela C.5 e Tabela C.6 da NBR 15.575-1.
2. Os componentes e itens relacionados à estrutura e vedações foram considerados com o limite mínimo de VUP. Itens relacionados com a cobertura e esquadrias com o limite superior de VUP. Revestimentos e pinturas foi considerado a média entre os limites mínimo e superior.
3. Pintura de esquadrias externas com base na Tabela C.4 da NBR 15575. Pintura das portas internas com base no tempo de pintura das paredes internas. Para as pinturas das paredes externas foi considerada uma VUP de 10 anos, entretanto com uma manutenção a cada 5 anos de 1 demão de pintura. Isto significa em torno de 7 renovações de pintura completa considerando as demãos na vida útil do edifício de 50 anos. Desta forma, para simplificação dos cálculos de ACVE e análise econômica foi utilizado o valor de 7 anos de VUP para as paredes externas. De outro lado, para a pintura das paredes internas a VUP foi estimada em 6 anos, com manutenção de 1 demão a cada 3 anos. Assim seriam necessárias 11,5 renovações na vida útil do edifício de 50 anos. Portanto, foi aproximado a vida útil da pintura das paredes internas considerando 5 anos, incluindo assim nesse valor a manutenção prevista. Para simplificação, os mesmos valores foram adotados para pintura das esquadrias quando necessário considerando-se respectivamente as externas e internas.

H.2 Dados compilados de energia e emissões de CO₂ incorporadas disponíveis em algumas pesquisas brasileiras

MATERIAL E FONTE	Energia Incorporada (MJ/kg)	MATERIAL E FONTE	Emissões de CO ₂ incorporado (kgCO ₂ /kg)
ALVENARIA		ALVENARIA	
Cerâmica vermelha_BEN/ABC 2004 apud Tavares (2006)	2,71	Cerâmica telhas e tijolos_Costa (2012) ⁴⁸	0,091
Cerâmica vermelha-bloco de 8 furos_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	3,6	Cerâmica vermelha-Bloco 9x14x19_Stachera (2008) ⁴⁹	0,51
Cerâmica vermelha-bloco de 8 furos_MIC/CETEC MG (1982) apud Tavares (2006)	2,87	Cerâmica vermelha_Taborianski e Prado (2012)	0,29
Cerâmica vermelha-bloco de 8 furos_Tavares (2006) ⁵⁰	2,9		
Cerâmica vermelha_Manfredini (2003)_1 ⁵¹	2,46		
Cerâmica vermelha_Manfredini (2003)_2 ⁵²	2,09		
Cerâmica vermelha_Manfredini (2003)_3 ⁵³	2,96		
Cerâmica vermelha_Tavares (1999)_1 ⁵⁰	2,92		
Cerâmica vermelha_Tavares (1999)_2 ⁵⁰	2,05		
Cerâmica vermelha_Tavares (1999)_3 ⁵⁰	2,86		
Cerâmica vermelha_Tavares (1999)_4 ⁵⁰	2,83		
Cerâmica vermelha_Tavares (2006) ⁵⁰	2,9		
Cerâmica vermelha-tijolo de 6 furos_Soares e Pereira (2004) ⁵⁴	3,28		
Cerâmica vermelha-tijolo (maciço)_Manfredini (2003) ⁵⁵	2,21		
Blocos e tijolos cerâmicos_Manfredini e Sattler (2005) ⁵⁶	2,82		
AREIA		CO₂ AREIA	
Gonçalves 1985 apud Tavares (2006)	0,06	Lima (2010)	0,0058
MIC/CETEC 1982 apud Tavares (2006)	0,02	Costa 2012 ⁴⁸	0,0722
Tavares (2006) ⁵⁷	0,05	Stachera e Casagrande (2007) ⁵⁸	0,0151
		Souza_(2012)	0,01482

⁴⁸ Todos os dados aqui apresentados de Costa (2012) consideram o fator de emissão no nível básico conforme método do autor, desconsiderando transporte.

⁴⁹ Valor com base em Stachera (2008).

⁵⁰ Pesquisa do próprio autor.

⁵¹ Média ponderada das indústrias pequenas conforme levantamento do autor em indústrias de RS.

⁵² Média ponderada das indústrias médias conforme levantamento do autor em indústrias de RS.

⁵³ Média ponderada das indústrias grandes conforme levantamento do autor em indústrias de RS.

⁵⁴ Dados de média de duas indústrias, com base em Kuhn (2006) "Valores calculados por m² e convertidos para kg; os valores apresentados no trabalho de Pereira (2004) estão em massa e volume, para obtenção dos índices energéticos foram convertidos segundo os respectivos poderes caloríficos apresentados no anexo E do BEN 2005".

⁵⁵ Média de três indústrias.

⁵⁶ Valor da média ponderada pelo número de peças produzidas mensalmente pelas indústrias pequenas, médias e grandes, conforme levantamento em RS.

⁵⁷ Dado da referência estimado pelo autor como valor médio com base em: BOUSTEAD e HANCOCK (1979); MIC-CETEC MG (1982); GUIMARÃES (1985); ALCORN (1996); LAWSON (1996); ANDERSEN, (1993); BLANCHARD, (1998); SCHEUER e REPPE (2003).

⁵⁸ Base na referência considerando densidade da areia de 1500 kg/m³ conforme a NBR 15220.

Apêndice H.2 (continuação).

MATERIAL E FONTE	Energia Incorpor. (MJ/kg)	MATERIAL E FONTE	Emissões de CO2 incorp.(kgCO2/kg)
ARGAMASSA		CO₂ ARGAMASSA	
Mistura_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	3,47	Caldas et al. (2015) com base em Costa (2012)	0,16
Mistura_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	0,54	Silva (2013)	0,116
Mistura_Tavares (2006) ⁵⁷	2,1		
Silva (2013)	0,64		
BRITA		CO₂ BRITA	
MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	0,03	Lima (2010)	0,0154
Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	0,08	Souza (2012)	0,00275
Rosa (2010)	0,026		
CAL		CO₂ CAL	
Hidratada_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	4,03	Virgem_Silva_J.Mendo Consultoria (2009)	1,131
Virgem_Tavares (2006) ⁵⁷	3	Hidratada_Stachera e Casagrande (2007)	0,7855
Bajay (2010)	4,296	Hidratada_Costa (2012) ⁴⁸	0,81
CIMENTO		CO₂ CIMENTO	
Portland_BEN/ABCP (2004) apud Tavares (2006)	4,13	Portland sem adições_Carvalho (2002)	0,855
Portland CPI_Carvalho (2002)	3,59	Portland CPIIE_Carvalho (2002)	0,565
Portland CPIIE_Carvalho (2002)	2,46	Portland CP III_Carvalho (2002)	0,256
Portland CP III_Carvalho (2002)	1,25	Portland CP IV_Carvalho (2002)	0,428
Portland CP IV_Carvalho (2002)	1,88	Oliveira et al. (2014)	0,656
Portland_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	4,04	Oliveira et al. (2014)	0,597
Portland_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	4,96	Oliveira et al. (2014)	0,517
Portland_Ribeiro (2003)	4,04	Holcim (2013)	0,473
Portland_Tavares (2006) ⁵⁰	4,2	Portland_Stachera (2008)	0,968
		Souza (2012)	0,727
CONCRETO		CO₂ CONCRETO	
Simples_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	0,56	Concreto 25 Mpa-cimento CP II F_Caldas et al. (2015) com base em Costa (2012) ⁴⁸	0,14
Simples_Tavares (2006) ⁵⁷	1,2		
Armado_Tavares (2006) ⁵⁷	3,1		
GESSO		CO₂ GESSO	
Acartonado_Tavares (2006) ⁵⁷	6,1	Gesso placas_Costa (2012) ⁴⁸	0,47
Placa_Tavares (2006) ⁵⁷	4,5		
ISOLANTE		CO₂ ISOLANTE	
Lã mineral_Tavares (2006) ⁵⁷	19		
Lã de rocha_Habib (2014) ⁵⁹	10,9	Lã de rocha_Habib (2014)	1,44
Lã de rocha_Habib (2014)	11,7		
EPS_Tavares (2006) ⁵⁷	112		

⁵⁹ Os valores de Habib (2014) correspondem a valores de duas fábricas, estimados conforme dados da referência.

Apêndice H.2 (continuação)

MATERIAL E FONTE	Energia Incorporada (MJ/kg)	MATERIAL E FONTE	Emissões de CO ₂ incorporado (kgCO ₂ /kg)
MADEIRA		CO₂ MADEIRA	
Acabada nativa ⁶⁰ _Garcia (2014)	3,3	Acabada (nativa) ⁶⁰ _Garcia (2014)	13,06
Acabada plantada ⁶⁰ _Garcia (2014)	12,71	Acabada (plantada) ⁶⁰ _Garcia (2014)	0,20
Batente madeira aparelhada_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	3,35	Aserrada bruta e aplanada (nativa) ⁶⁰ _Garcia (2014)	16,15
Batente madeira aparelhada_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	8,37	Aserrada bruta e aplanada (plantada) ⁶⁰ _Garcia (2014)	0,09
Batente madeira aparelhada_Tavares (2006) ⁵⁰	3,5		
Chapa de compensado_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	5,44		
Porta de madeira aparelhada_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	3,35		
Porta de madeira aparelhada_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	8,37		
Serrada bruta e aplanada (nativa) ⁶⁰ _Garcia (2014)	1,38		
Serrada bruta e aplanada (plantada) ⁶⁰ _Garcia (2014)	7,86		
METAL		CO₂ METAL	
Aço_BEN/IBIS (2004) apud Tavares (2006)	30,49	Chapa de alumínio_Gouveia e Sposto (2015)	1,96
Aço cantoneira laminada_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	47,27	Perfis de alumínio_Gouveia e Sposto (2016)	2,4
Aço chapa dobrada_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	15,04	Chapa de alumínio (reciclado)_Gouveia e Sposto (2015)	0,513
Aço chapa dobrada_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	46,05	Perfis de alumínio (reciclado)_Gouveia e Sposto (2016)	0,87
Aço galvanizado_Guimarães (1985) apud Sperb (2000)	32,46	Alumínio_Caldas et al. 2015 com base em Costa (2012)	4,03
Aço galvanizado_Tavares 2006 ⁵⁷	33,8	Alumínio_Taborianski e Prado (2012)	3,23
Aço_Guimarães (1985) apud Sperb (2000)	25,58	Aço_Stachera (2008)	1,45
Aço laminado CA 50A_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	25,59	Aço_Costa (2012)	1,82
Aço laminado CA 50A_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	21,81		
Aço laminado CA 50A_Tavares 2005 ⁵⁰	30		
Alumínio_Guimarães (1985) apud Sperb (2000)	98,82		
Alumínio lingote_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	45,87		
Alumínio lingote_Tavares (2005) ⁵⁰	98,2		
Alumínio_Schuler (1997)	98,2		
Chapa de alumínio (reciclado)_Gouveia e Sposto (2015)	22,06		
Perfis de alumínio (reciclado)_Gouveia e Sposto (2016)	22,38		

⁶⁰ Garcia (2014) especificou faixas de valores para energia incorporada e emissões de CO₂ de madeira mostrando o valor mínimo, máximo e mediana. Todos os valores dessa referência mostrados nesta tabela são referentes aos valores da mediana estimada pela autora na sua pesquisa.

Apêndice H.2 (continuação)

MATERIAL E FONTE	Energia Incorporada (MJ/kg)	MATERIAL E FONTE	Emissões de CO ₂ incorporado (kgCO ₂ /kg)
PISO e REVESTIMENTO		CO₂ PISO e REVESTIMENTO	
Cerâmica branca_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	39,34	Cerâmica de revestimento_Coelho_J Mendo cons. (2009) ⁶¹	0,123
Cerâmica branca_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	12,98	Cerâmica de revestimento_Coelho_J Mendo cons. (2009) ⁶²	0,172
Cerâmica branca_Tavares (2006) ⁵⁷	25	Cerâmica de revestimento_Coelho_J Mendo consult. (2009) ⁶³	0,269
Cerâmica de revestimento_ANFACER/BEN (2004) apud Tavares (2006)	4,15	Cerâmica de revestimento_Monfort et al. (2011) ⁶⁴	0,267
Cerâmica de revestimento tipo monoqueima_Tavares (2006) ⁵⁰	5,1		
Cerâmica piso esmaltado_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	23,36		
Cerâmica piso esmaltado_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	12,98		
Placa cerâmica esmaltada PI IV_Pereira (2004) ⁵⁴	7,45		
PVC		CO₂ PVC	
Guimarães (1985) apud Tavares (2006)	74,33		
Tavares 2006 ⁵⁷	80	PVC_Costa (2012)	0,553
TELHA		CO₂ TELHA	
Cerâmica não esmaltada_Manfredini (2003)	9,73	Pereira (2014) ⁶⁵	0,42
Cerâmica não esmaltada_Tavares (2006) ⁵⁷	5,4	Costa (2012)	0,091
Fibrocimento telha_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	0,31		
Fibrocimento telha_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	4,19		
Telha de vidro_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	23,13		
Blocos_tijolos_telha_Manfredini e Sattler (2005)	5,59		
TINTA		CO₂ TINTA	
Tinta acrílica_Tavares (2006) ⁵⁷	61	Tavares (2006)	0,7
Tinta óleo_Tavares (2006) ⁵⁷	98,1		
Tinta PVA látex_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	2,19		
Tinta PVA látex_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	1,25		
Tinta PVA látex_Tavares (2006) ⁵⁷	65		
VIDRO		CO₂ VIDRO	
Vidro plano_Gonçalves (1985) apud Tavares (2006)	27,94	Vidro plano_Taborianski e Prado (2011)	0,83
Vidro plano_Guimarães (1985) apud Tavares (2006)	27,93	Vidro plano_Costa (2012)	0,8
Vidro plano_MIC/CETEC (1982) apud Tavares (2006)	19,61		
Vidro plano_Tavares 2006 ⁵⁷	18,5		

⁶¹ Valor mínimo considerado pelo autor.

⁶² Valor médio considerado pelo autor.

⁶³ Valor máximo considerado pelo autor.

⁶⁴ Emissões de CO₂ na produção de revestimentos cerâmicos em estado estacionário considerando a média da cerâmica monoqueima clara esmaltada.

⁶⁵ Valor obtido com base na referência.

H.3 Dados de alguns materiais compilados de energia, emissões de CO₂ e emissões de CO₂eq incorporadas com base em dados internacionais

Material	Gomes e Silva (2015)			ICE Bath (2011)		
	Energia incorp. (MJ/kg)	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Emissões de CO ₂ eq (kgCO ₂ eq/kg)	Energia incorp. (MJ/kg)	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Emissões de CO ₂ eq (kgCO ₂ eq/kg)
ALVENARIA						
Bloco cerâmico	2,52	0,23	0,24			
Tijolo comum				3	0,23	0,24
AREIA						
Areia média				0,081	0,0048	0,0051
ARGAMASSA						
Argamassa colante	0,99	1,01	1,2			
Argamassa				0,85/ 1,34	0,127/ 0,2	0,136/ 0,221
BRITA						
Brita (Brita ou pedrisco)				0,083	0,0048	0,0052
CAL						
Cal hidratada	0,24	0,74	0,78			
Cal				5,3	0,76	0,78
CIMENTO						
CP I-S-32	3,37	0,51	0,51			
CP II-E-32	2,47	0,37	0,37			
CP III-32	1,17	0,17	0,18			
Cimento geral				4,5	0,73	0,74
Cimento Portland CEM I sem adições				5,5	0,93	0,95
CONCRETO						
Concreto geral				0,75	0,1	0,107
Concreto prefabricado geral				1,2	0,127	0,557
Concreto RC-30% cinza volante-20/25Mpa				0,73	0,101	0,108
Concreto RC-25% escória de alto forno-20/25Mpa				0,74	0,097	0,104
Concreto RC-50% escória de alto forno-20/25Mpa				0,62	0,072	0,077

Apêndice H.3 (continuação)

Material	Gomes e Silva (2015)			ICE Bath		
	Energia incorp. (MJ/)	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Emissões de CO ₂ eq (kgCO ₂ eq/kg)	Energia incorp. (MJ/)	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Emissões de CO ₂ eq (kgCO ₂ eq/kg)
ISOLANTE						
Isolante geral				45	1,86	
Lã de rocha				16,8	1,05	1,12
MADEIRA						
Madeira geral				10	0,30fos+ 0,41bio	0,31fos+ 0,41bio
METAL						
Aço CA 50	10,27	1,55	1,95			
Perfil do aço (estrutura cobertura)	9,36	1,39	1,78			
Alumínio geral				155	8,24	9,16
Alumínio geral virgem				218	11,46	12,79
Alumínio geral reciclado				29	1,69	1,81
Aço virgem				35,4	2,71	2,89
Aço reciclado				9,4	0,44	0,47
Aço inoxidável				56,7	6,15	
PISO e REVESTIMENTO						
Cerâmica				12	0,74	0,78
PVC						
PVC geral				77,2	2,61	3,1
Tubo de PVC	65,24	5,92	9,85			
TELHA						
Telha cerâmica	1,59	0,63	0,76			
Telha cerâmica				6,5	0,45	0,48
TINTA						
Tinta geral				70	2,42	2,91
Tinta a base de água				59	2,12	2,54
Tinta base solvente				97	3,13	3,76
VIDRO						
Primary glass				15	0,86	0,91
Vidro Secondary glass				11,55	0,55	0,59

NOTA: Os valores de Gomes e Silva (2015) são da base de dados da Econinvent ajustados à matriz brasileira.

Para a escolha de valores a ser usados nesta pesquisa para energia incorporada e emissões de CO₂ dos materiais foi considerado em ordem de relevância que fossem: dados primários de pesquisas nacionais; mais recentes; que ficassem próximo da média dos valores levantados; e, que estivessem dentro do rango para valores nacionais estimado na pesquisa de Garcia (2014). Com relação aos dados compilados de energia e emissões incorporadas nos principais materiais, observaram-se algumas semelhanças e diferenças, nos dados coletados nas pesquisas brasileiras com fontes primárias e, nas referências internacionais. Aqui são colocadas as observações com relação às duas fontes de dados e comentada a escolha dos valores assumidos para a pesquisa.

Com relação aos dados de concreto, estes são mostrados nas referências internacionais por resistência. Por outro lado, no cimento, os dados nacionais mostraram muita variação; devido a que pesquisas mais recentes, colocam o tipo de cimento usado, o que não foi observado nas pesquisas mais antigas. Para a pesquisa foi assumido o uso do cimento CP II.

De outra parte, a maioria dos dados de energia e emissão incorporada mostrados por Gomes e Silva (2015), com base na Ecoinvent, ficaram perto das médias nacionais, porém, com algumas exceções, entre elas para o material cal. Para a cal, o valor mínimo da faixa estabelecida por Garcia (2014) para esse material fica muito longe das outras referências nacionais obtidas. Contudo, os valores dessa faixa são próximos da referência do ICE Bath, tanto em relação à energia incorporada quanto à emissão incorporada.

Para o material areia os valores nacionais não apresentaram muita variação. Na cerâmica vermelha, os valores nacionais de energia incorporada não mostram muita variação, ao tempo que, são muito similares às referências internacionais.

Dados nacionais e internacionais encontrados sobre energia incorporada no PVC são muito similares, entretanto, as emissões incorporadas das pesquisas internacionais apresentam valores muito maiores aos das referências nacionais.

Para madeira, a pesquisa nacional de Garcia (2014) diferencia entre diversos tipos de madeira, considerando a sua fonte: nativa ou plantada. Dados sobre este material apresentam muita variação, tanto em energia quanto em emissões incorporadas, especialmente, por conta da fonte da madeira. As pesquisas com valores internacionais não consideram esta diferença, sendo que os dados de energia e emissões

incorporadas elencados pelas pesquisas internacionais, ficam na média dos valores de madeira plantada contemplados por Garcia (2014). Para o caso base, foi adotada madeira nativa para a estrutura do telhado, com base nos memoriais dos projetos analisados para a tipologia unifamiliar térrea. Por outro lado, foi considerado o uso de madeira plantada para as portas internas. Para os outros casos avaliados que tinham uso de madeira, foram consideradas paredes e forro como sendo de madeira plantada. Os dados com relação à madeira foram assumidos tomando como referência os valores da mediana encontrados por Garcia (2014).

Para o piso esmaltado, as referências nacionais variam muito com relação à energia incorporada. Por outro lado, o valor internacional na base da ICE Bath ficou na mediana dos valores nacionais. Para a brita os valores de energia incorporada da base ICE Bath são semelhantes às referências nacionais encontradas.

Com relação ao alumínio, a referência da base do ICE Bath distingue entre alumínio geral e reciclado, com grande diferença entre os dois para energia e emissões incorporadas. Nas pesquisas nacionais encontrou-se esta diferenciação somente para um autor. E, foi observado que os valores de alumínio geral, são superiores nas bases internacionais quando comparados às bases nacionais, tanto para energia incorporada, quanto nas emissões incorporadas. Para o caso base foram assumidos valores de alumínio geral das referências nacionais. No caso do vidro, os valores encontrados para energia e emissões incorporadas do material, são muito semelhantes tanto nas pesquisas nacionais, quanto internacionais. Entretanto, na referência internacional os dados são diferenciados por tipo de vidro.

Para os dados de tinta foram assumidos valores de Tavares (2006), embora não sendo valores primários. Somente foram encontrados dados primários de pesquisas nacionais para tinta com PVA. Os dados de energia incorporada para tinta de Tavares (2006) encontram-se muito perto de valores internacionais, entretanto longe das pesquisas nacionais sobre tinta PVA. Finalmente, as emissões de CO₂ apresentam valores maiores na referência internacional.

H.4 Custos iniciais dos materiais do caso base e medidas analisadas para São Paulo e Salvador com base no SINAPI de Março 2016

ESTRATÉGIAS								
Medida	ESTRUTURA	Descrição materiais	Composição/ Materiais	DADOS CUSTOS. Preço mediano Março 2016 SINAPI				
				Descrição custos	Código SINAPI	São Paulo (R\$)	BAHIA (R\$)	Unid
EST0	Estrutura em concreto (CASO BASE)	concreto		Concreto usinado bombeável, classe de resistência c20, com brita 0 e 1, exclui bombeamento	34492	219,21	287,98	m ³
		massas de assentamento (reboco + chapisco + argamassa)	cimento	Cimento Portland composto CP II32	1379	0,48	0,55	kg
			cal hidratada	Cal hidratada CH-I para argamassas	1106	0,45	0,89	kg
			areia média	Areia média - posto jazida/fornecedor (sem frete)	370	59	68	m ³
EST1	Estrutura em madeira		madeira	Madeira serrada não aparelhada de maçaranduba, angelim ou equivalente da região	3997	2.056,81	2.922,83	m ³
Medida	COBERTURAS	Descrição materiais	Composição/ Insumos	DADOS CUSTOS				
				Descrição custos	Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)	unid ade
COB0	Telha de barro cor natural (CASO BASE) α 0.6			Telha cerâmica tipo colonial, comprimento de *44* cm, rendimento de *26* telhas/m ²	7176	1,3	1,2	Unid
	Estrutura em madeira			Trama de madeira composta por ripas, caibros e terças para telhados de até 2 águas para telha de encaixe de cerâmica ou de concreto, incluso transporte vertical	92539	41,64	52,58	m ²
COB6	Telha de barro cor natural + isolante 5cm	telha de barro α 0.5		Telha cerâmica tipo colonial, comprimento de *44* cm, rendimento de *26* telhas/m ²	7176	1,3	1,2	Unid
		lã de rocha 5cm		Painel de Lã de Rocha 1200 x 600 x 50 mm - Densidade 32 kg/m ³		26,15	26,15	m ²
	Estrutura em madeira			Trama de madeira composta por ripas, caibros e terças para telhados de até 2 águas para telha de encaixe de cerâmica ou de concreto, incluso transporte vertical	92539	41,64	52,58	m ²
COB10	Cobertura telha metálica + isolante 5cm	telha metal branca		Telha de aço zincado trapezoidal autoportante, a = 120 mm, e = 0,95 mm, com pintura eletrostática branca em 1 face	14171	56,2	62,21	m ²
		lã de rocha 5cm		Painel de Lã de Rocha 1200 x 600 x 50 mm - Densidade 32 kg/m ³		26,15	26,15	m ²
	Estrutura em madeira			Trama de madeira composta por ripas, caibros e terças para telhados de até 2 águas para telha de encaixe de cerâmica ou de concreto, incluso transporte vertical	92539	41,64	52,58	m ²

Apêndice H.4 (continuação)

ESTRATÉGIAS								
Medida	ALVENARIA	Descrição materiais	Composição/ Materiais	DADOS CUSTOS				
				Descrição custos	Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)	Unid
PAR0	Alvenaria 13 cm tijolo 6 furos + reboco interno e externo (CASO BASE)	reboco 2 cm	cimento	Cimento portland composto CPII-32	1379	0,48	0,55	kg
			cal	Cal hidratada CH-I para argamassas	1106	0,45	0,89	kg
			areia	Areia média - posto jazida/fornecedor (sem frete)	370	59	68	m ³
		tijolo 6 furos 9x14x19 cm	tijolo	Bloco cerâmico (vedação), 6 furos, de 9x14x19 cm	7267	0,31	0,31	Unid
PAR1	Alvenaria dupla 25 cm com tijolo 6 furos + câmara de ar e reboco interno e externo	reboco 2 cm	cimento	Cimento Portland composto CPII-32	1379	0,48	0,55	kg
			cal	Cal hidratada para argamassas	1106	0,45	0,89	kg
			areia	Areia média - posto jazida/fornecedor (sem frete)	370	59	68	m ³
		tijolo 6 furos 9x14x19 cm	tijolo	Bloco cerâmico (alvenaria vedação), 6 furos, de 9x 4x19 cm	7267	0,31	0,31	Unid
PAR2	Alvenaria 15 cm tijolo 8 furos + reboco interno e externo	reboco 2 cm	cimento	Cimento Portland composto CPII-32	1379	0,48	0,55	kg
			cal	Cal hidratada para argamassas	1106	0,45	0,89	kg
			areia	Areia média - posto jazida/ fornecedor	370	59	68	m ³
		tijolo 8 furos 11x19x19 cm	tijolo	Bloco cerâmico de vedação com furos na horizontal, 11,5x19x19 cm - 4,5 MPA	38783	0,56	0,55	Unid
PAR3	Alvenaria 18 cm tijolo 9 furos + reboco inerno e externo	reboco 2 cm	cimento	Cimento Portland composto CPII-32	1379	0,48	0,55	kg
			cal	Cal hidratada para argamassas	1106	0,45	0,89	kg
			areia	Areia média - posto jazida/fornecedor (sem frete)	370	59	68	m ³
		tijolo 9 furos 14x19x19 cm	tijolo	Meio bloco estrutural cerâmico 14x19x19 cm, 6,0 MPA	34781	0,96	0,95	Unid
PAR5	Parede dupla de madeira + isolante em lâ de rocha	chapa madeira pinus/eucalipto/nativas 2,5 cm		Chapa de madeira compensada de pinus, virola ou equivalente, de *2,2x1,6*m, e =25 mm	11132	42,52	43,95	m ²
		madeira para estrutura das chapas	madeira	Madeira serrada não aparelhada de maçaranduba, angelim ou equivalente da região	3997	2.056,81	2.922,83	m ³
		isolante lâ de rocha 5 cm		Painel de Lã de Rocha 1200x600x50 mm - Densidade 32 kg/m ³	Outr ⁶⁶	26,15	26,15	m ²
PAR8	Parede concreto 10 cm + isolante 2,5cm	reboco 2 cm	cimento	Cimento Portland composto CPII-32	1379	0,48	0,55	kg
			cal	Cal hidratada para argamassas	1106	0,45	0,89	kg
			areia	Areia média - posto jazida/fornecedor (sem frete)	370	59	68	m ³
		lã de rocha 2,5 cm		Painel de Lã de Rocha 1200x600x25 mm - Densidade 32 kg/m ³		22,22	22,22	m ²
parede em concreto 10 cm		Concreto usinado bombeável, classe de resistência c20, com brita 0 e 1, exclui bombeamento	34492	219,21	287,98	m ³		

⁶⁶ Com base em fornecedores.

Apêndice H.4 (continuação)

ESTRATÉGIAS										
Medida	FORROS	Descrição materiais	Composição/ Insumos	DADOS CUSTOS					Unid	
				Descrição custos	Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)			
FOR0	Forro em PVC (CASO BASE)	Forro em PVC		Forro de PVC em regua de 100 mm (com colocação, exclusive estrutura de suporte)	11587	35	45	m ²		
		Estrutura forro PVC		Sarrafo de madeira não aparelhada 2,5x10cm espaçadas cada 50cm. Maçaranduba, angelim ou equivalente da região	4460	12,56	17,86	m ²		
FOR1	Forro em madeira	Forro em madeira		Media para forro de madeira códigos SINAPI 3286/83		33,56	26,5	m ²		
		Estrutura forro madeira		Sarrafo de madeira não aparelhada 2,5x10 cm espaçadas cada 50 cm. Maçaranduba, angelim ou equivalente da região	4460	12,56	17,86	m ²		
FOR2	Laje em concreto EPS	concreto		Concreto usinado bombeável, classe de resistência c20, com brita 0 e 1	34492	219,21	287,98	m ³		
		EPS (poliestireno expandido moldado)		Placa de EPS com 1,20mx0,50x0,02m (vol=0.0144m3) valor R\$5,19 m ² para SP e R\$ 3,85 para Bahia. Ajustado à m ³	3408	432,5	320,83	m ³		
		argamassa de regularização		Argamassa pronta para contrapiso	36886	0,42	0,57	kg		
Medida	PISOS	Descrição materiais	Composição/ Insumos	DADOS CUSTOS					Unid	
				Descrição custos	Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)			
PISO	Piso cerâmica + laje de concreto (CASO BASE)	piso cerâmica 1 cm		Cerâmica esmaltada extra ou 1a qualidade p/ piso pei-4 - linha popular	1289	24,38	16,76	m ²		
		argamassa de regularização 2 cm	cimento	Cimento Portland composto CII-32	1379	0,48	0,55	kg		
			areia	Areia média - posto jazida/fornecedor (sem frete)	370	59	68	m ³		
		laje de concreto 5 cm	concreto	Concreto usinado bombeável, classe de resistência c20, com brita 0 e 1 100 +/- 20 mm, exclui bombeamento	34492	219,21	287,98	m ³		
brita 3 cm	brita	Pedra britada n. 2 (19 a 38 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	4718	54,47	55,10	m ³				
Medida	ESQUADRIAS	Descrição materiais	Dimensões janela	DADOS CUSTOS					SP (R\$) Total	BAHIA (R\$)
				Descrição custos	Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)	unid ade		
ESQ0 SP e Salv (CASO BASE)	Sala de estar	esquadria em alumínio. 1,50x1,00 m. FV 0,45/correr / sem veneziana		Janela alumínio de correr 1,00 x 1,50 m (axl) com 2 folhas de vidro incluso guarnição	34367	658,58	248,1	Unid	2.756,86	1.038,56
	Cozinha	esquadria em alumínio. 1,20x1,00 m. FV 0,45/correr/ sem veneziana		Valor calculado com base em Cod.34367 por m ²		526,864	198,48	Unid		
	Quarto 1	esquadria em alumínio. 1,50x1,00 m.FV 0,45 / correr / sem veneziana		Janela alumínio de correr 1,00 x 1,50 m (axl) com 2 folhas de vidro incluso guarnição	34367	658,58	248,1	Unid		
	Quarto 2	esquadria em alumínio. 1,50x1,00 m. FV 0,45/correr / sem veneziana		Janela alumínio de correr 1,00 x 1,50 m (axl) com 2 folhas de vidro incluso guarnição	34367	658,58	248,1	Unid		
	Banheiro	esquadria em alumínio. 0,80X0,60 m. FV 0,90/basculante / sem veneziana		Janela alumínio basculante 80 x 60 cm (axl)	34377	254,26	95,78	Unid		

Apêndice H.4 (continuação)

ESTRATÉGIAS										
Medida	ESQUADRIAS	Descrição materiais	Dimensões janela	DADOS CUSTOS					SP (R\$) Total	BAHIA (R\$)
				Descrição custos	Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)	Unid		
ESQ1 SP e Salv	Sala de estar	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,45 /correr / sem veneziana	Janela alumínio de correr 1,00 x 1,50 m (axl) com 2 folhas de vidro incluso guarnição	34367	658,58	248,1	Unid	5.447,7	4.550,36	
	Cozinha	esquadria em alumínio.1,20x1,00 m. FV 0,45/correr/ sem veneziana	Valor calculado com base em 00034367		526,86	198,48	Unid			
	Quarto 1	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,45/correr /com veneziana	Com base em pesquisa fornecedores. Veneziana tipo enrolar		1.336	1.336	m²			
	Quarto 2	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,45 / correr / com veneziana	com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m²			
	Banheiro	esquadria em alumínio. 0,80X0,60 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana	Janela alumínio basculante 80 x 60 cm (axl)	34377	254,26	95,78	Unid			
ESQ2 SP e Salv	Sala de estar	esquadria em alumínio. 1,50x1,00 m. FV 0,45 /correr / com veneziana	com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m²	7.869,4	7.710,9	
	Cozinha	esquadria em alumínio.1,20x1,00 m. FV 0,45/correr/com veneziana	com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m²			
	Quarto 1	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,45/correr / com veneziana	com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m²			
	Quarto 2	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,45 / correr / com veneziana	com base em pesquisa fornecedores		1336	1336	m²			
	Banheiro	esquadria em alumínio. 0,80x0,60 m. FV 0,90/ basculante/sem veneziana	Janela alumínio basculante 80 x 60 cm (axl)	34377	254,26	95,78	Unid			
ESQ3 SP e Salv	Sala de estar	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,90 /correr / sem veneziana	com base em janela madeira regional 1a abrir tp almofada c/ guarnição	3431	514,32	393,81	m²	3.185,8	2.340,5	
	Cozinha	esquadria em alumínio.1,20x1,00 m. FV 0,90/correr/ sem veneziana	com base em janela madeira regional 1a abrir almofada c/ guarnição	3431	514,32	393,81	m²			
	Quarto 1	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,90 / correr / sem veneziana	com base em janela madeira regional 1a abrir almofada c/ guarnição	3431	514,32	393,81	m²			
	Quarto 2	esquadria em alumínio.1,50x1,00 m. FV 0,90/correr / sem veneziana	com base em janela madeira regional 1a abrir almofada c/ guarnição	3431	514,32	393,81	m²			
	Banheiro	esquadria em alumínio. 0,80X0,60 m. FV 0,90/ basculante/sem veneziana	janela alumínio basculante 80 x 60 cm (axl)	34377	254,26	95,78	Unid			
ESQ4 SP e ESQ8 para Salv	Sala de estar	esquadria em alumínio./correr /sem veneziana SP: 1,50x1,20 m.FV 0,45 (alt:1,20m). Para SALV peitoril 0,80 m. 1,50 x 1,40 m.	janela alumínio de correr 1,20 x 1,50 m (axl) com 2 folhas de vidro incluso guarnição	SP: 34363 -SALV: Base em 34363	785,46	345,22	Unid	3.360	1.340,90	
	Cozinha	esquadria em alumínio. correr/sem veneziana SP: 1,20x1,20 m. FV 0,45/ (alt:1,20m) . Para SALV peitoril 0,80 m 1,20x1,40 m.	janela alumínio de correr 1,20 x 1,20 (axl) m com 2 folhas de vidro incluso guarnição	SP: 34362 Salv: base em 34363	664,62	276,17	Unid			
	Quarto 1	esquadria em alumínio. /correr / sem veneziana SP: 1,50x1,20 m. FV 0,45 (alt:1,20 m)	SP: janela alumínio de correr 1,20 x 1,50 m (axl) com 2 folhas de vidro incluso guarnição Salv: idem à ESQ_0	SP e Salv: 34363	785,46	295,90	Unid			
	Quarto 2	esquadria em alumínio /correr / sem veneziana. SP: 1,50x1,20 m. FV 0,45 (alt: 1,20m)	SP: janela alumínio de correr 1,20 x 1,50 m (axl) com 2 folhas de vidro incluso guarnição Salv: idem à ESQ_0	SP e Salv: 34363	785,46	295,90	Unid			
	Banheiro	esquadria em alumínio. basculante/sem veneziana SP:0,80x0,80 m. FV0,90/(alt:1,20 m)	SP e Salv:: Com base em 34377 por m²		339	127,71	Unid			

Apêndice H.4 (continuação)

ESTRATÉGIAS										
Medida	ESQUADRIAS	Descrição materiais	Dimensões janela	DADOS CUSTOS					SP (R\$) Total	BAHIA (R\$)
				Descrição custos	Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)	unid ade		
ESQ9 + ESQ2 p/ Salv	Sala de estar	esquadria em alumínio. 1,50x1,40m. FV 0,90 Com veneziana (alt: 1,40m). Peitoril 0,80m.		com base em pesquisa fornecedores. Para esquadrias com FV 0,90 considerou-se como base o preço das janelas com FV 0,45 acrescentando 30%		1.736,80	1.736,80	m ²	13.156,58	12.945,29
	Cozinha	esquadria em alumínio. 1,20x1,40m. FV 0,90 Com veneziana (alt:1,40 m). Peitoril 0,80 m.		com base em pesquisa fornecedores.		1.736,80	1.736,80	m ²		
	Quarto 1	esquadria em alumínio. 1,50x1,20 m. FV 0,90. Com veneziana (alt:1,20 m)		com base em pesquisa fornecedores.		1.736,80	1.736,80	m ²		
	Quarto 2	esquadria em alumínio. 1,50x1,20m. FV 0,90 Com veneziana (alt:1,20m)		com base em pesquisa fornecedores..		1.736,80	1.736,80	m ²		
	Banheiro	esquadria em alumínio. 0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante / (alt:1,20 m)		Com base em 34377 por m ²	34377	339	127,71	Unid		
ESQ1 + ESQ8 p/ Salv	Sala de estar-	esquadria em alumínio. 1,50x1,40 m./correr. Peitoril 0,80 m		Com base em 34367 por m ²		439,05	165,4	m ²	6.808,22	5.562,52
	Cozinha	esquadria em alumínio. 1,20x1,40 m. FV 0,45/ correr/ Peitoril 0,80 m		Com base em 34367 por m ²		439,05	165,4	m ²		
	Quarto 1	esquadria em alumínio. 1,50x1,20 m. FV 0,45 / correr / Com veneziana		Com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m ²		
	Quarto 2	esquadria em alumínio. 1,50x1,20 m. FV 0,45/ correr / Com veneziana		Com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m ²		
	Banheiro	esquadria em alumínio. 0,80X0,80 m. FV 0,90/ basculante / sem veneziana		Com base em 34377 por m2	34377	339	127,71	Unid		
ESQ1 + ESQ4 SP	Sala de estar	esquadria em alumínio. 1,50x1,20 m. FV 0,45 /correr / com veneziana		com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m ²	9.477,24	9.265,95
	Cozinha	esquadria em alumínio. 1,20x1,20 m. FV 0,45/ correr/com veneziana		com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m ²		
	Quarto 1	esquadria em alumínio. 1,50x1,20 m. FV 0,45/correr / com veneziana		com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m ²		
	Quarto 2	esquadria em alumínio.1,50x1,20 m. FV 0,45 / correr / com veneziana		com base em pesquisa fornecedores		1.336	1.336	m ²		
	Banheiro	esquadria em alumínio. 0,80X0,80m. FV 0,90/basculante/sem veneziana		Com base em 34377 por m ²	34377	339	127,7	Unid		

Apêndice H.4 (continuação)

ESTRATÉGIAS						
Medida	PORTAS	Descrição custos	DADOS CUSTOS			
			Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)	Unid ade
PORT_int0	Portas internas em madeira oca (CASO BASE)	Porta de madeira semi-oca, folha lisa para pintura 80 x 210 x 3,5cm	10555	79,21	67,97	Unid
PORT_ext0	Portas externas em metal (CASO BASE)	Porta de abrir em alumínio com lambri horizontal/laminada, acabamento anodizado natural, sem guarnição	4914	616,76	579,83	m ²
Medida	TINTAS	Descrição custos	DADOS CUSTOS			
			Código SINAPI	SP (R\$)	BAHIA (R\$)	Unid ade
TO	Paredes externas /internas	Selador acrílico	6085	6,43	6,87	L
	Paredes externas	Tinta acrílica Premium, cor branco fosco	7356	16,17	16,63	L
	Paredes internas/forro/ laje	Tinta látex PVA Premium, cor branca	7345	13,97	14,37	L
	Esquadrias /forro madeira	Tinta esmalte sintético acetinado	7311	19,4	19,74	L

Notas:

1. Os códigos do SINAPI referem-se à planilha de insumos do SINAPI, com exceção dos códigos das estruturas em madeira para as paredes e metálica para a cobertura, que se referem à códigos da planilha de composições do SINAPI.
2. O custo da material lâ de rocha é com base em pesquisa de fornecedores.
3. Os custos das janelas com fator de ventilação de 0,90 e venezianas foram com base nas mesmas esquadrias com fator 0,45 (de correr) acrescentado o valor de 30%. Isto foi adotado por conta de não se encontrar este tipo de esquadrias no material alumínio na base do SINAPI. Por outro lado, as esquadrias com este fator de abertura encontradas no SINAPI no material madeira possuem custo menor, portanto não foram consideradas adequadas.
4. Para as esquadrias mostra-se também o preço final para todas as esquadrias da habitação conforme a medida aplicada, tanto para São Paulo quanto para Salvador

H.5. Custos para deconstrução com base no SINAPI para São Paulo e Salvador

Descrição	Código SINAPI composições	Unid.	Serviço ou material aplicado na pesquisa	Custo Março 2016	
				São Paulo	Bahia
SERVIÇO ESTRUTURA					
Demolição manual de concreto armado	84152	m ³	Serviço_ parede em concreto	306,99	259,98
Demolição de concreto simples	73616	m ³	Contrapiso em concreto	234,76	198,81
Demolição de vergas, cintas e pilaretes de concreto	72216	m ³	Serviço_ estrutura em concreto e madeira	210,28	174,77
SERVIÇO PAREDES					
Demolição de alvenaria de tijolos furados s/reaproveitamento	73899/002	m ³	Serviço_ alvenaria em tijolo	90,29	76,46
Demolição de divisórias em chapas ou tábuas, inclusive demolição de entarugamento	722118	m ²	Paredes em madeira (já inclui a estrutura das paredes)	6,47	5,37
SERVIÇO COBERTURA					
Demolição manual de laje pré-moldada com transporte e carga em caminhão	85370	m ³	Concreto no forro de laje (associado somente à quantidade de concreto)	248,3	206,36
Colocação isolamento térmico com lã de vidro *	73833/001	m ²	Isolante lã de rocha para paredes e coberturas	9,7	8,06
Retirada de estrutura de madeira com tesouras para telhas onduladas	72229	m ²	Estrutura madeira cobertura com telha metálica	13,91	12,69
Demolição de telhas cerâmicas ou de vidro	72224	m ²	Telha cerâmica	9,7	8,06
Retirada de forro de madeira em tabuas	72236	m ²	Forro madeira	11,8	10,38
Retirada de forro em régua de PVC, inclusive retirada de perfis	72238	m ²	Forro em PVC	6,95	6,34
Retirada de estrutura de madeira com tesouras para telhas cerâmicas ou de vidro	72228	m ²	Estrutura madeira cobertura com telha cerâmica	17,39	15,86
Demolição de entarugamento de forro	72235	m ²	Estrutura em madeira para forro PVC ou madeira	6,47	5,37
Demolição de telhas onduladas	72225	m ²	Telha metálica	4,04	3,36
SERVIÇO PISO					
Demolição manual de piso / contrapiso de alta resistência	73801/001	m ²	Piso cerâmica	24,26	20,16
SERVIÇO ESQUADRIAS					
Retirada de folhas de porta de passagem ou janela	72142	Unid	Portas internas	9,3	9,14
Remoção de vidro comum	85421	m ²	Vidro janelas	11,62	10,98
Retirada de esquadrias metálicas	85334	m ²	Janelas e portas externas	16,17	13,44

Nota: * Para o isolante em lã de rocha foi associado o valor do custo de colocação (somente mão de obra), por não estar o custo de retirada ou demolição deste material presente na tabela de composições do SINAPI.

H.6. Caso base em São Paulo e Salvador: Quantitativo de materiais por componente

Componente	Material	Quantidade inicial do material (kg)	Compo-nente	Material	Quantidade Inicial do material (kg)
Estrutura	Concreto	2.104,73	Piso	Cerâmica (piso)	755,06
	Cimento CP II	61,00		Cimento CP II	158,96
	Cal hidratada	76,25		Areia	993,5
	Areia	457,55		Concreto	4.570,1
				Brita	1.490,25
Paredes alvenaria externa	Tijolo cerâmica	4.323,56	Janelas	Alumínio (esquadrias)	51,65
	Cimento CP II	513,79		Vidro (esquadrias)	48,72
	Cal hidratada	756,32	Portas	Alumínio (portas externas)	33,88
	Areia	4.081,60		Madeira plantada (portas internas)	92,74
Paredes alvenaria interna	Tijolo cerâmica	1.430,29	Pintura	Pintura para paredes externas (Selador)	27,80
	Cimento CP II	169,96		Tinta acrílica (paredes externas)	21,32
	Cal hidratada	250,20		Pintura para paredes internas (Selador)	8,53
	Areia	1.350,24		Tinta PVA látex (paredes internas)	13,08
				Tinta esmalte (Pintura portas internas)	2,14
Cobertura	Telha cerâmica	3.361,8			
	PVC (forro)	75,90			
	Madeira (estrutura)	878,88			
	Madeira (estrutura forro PVC)	134,12			

H.7. Dados de energia e emissão incorporada, densidade de massa aparente, desperdício e distancia dos materiais usados nos casos avaliados em SP e Salvador

Material	Densid. kg/m ³	Energia Inc. (MJ/kg)	Fonte energia incorporada	Emis. kgCO ₂ /kg	Fonte Emissões	Desperdício	Distância transporte	
							SP	SAL
Alumínio	2.700	98,2	Tavares (2005)	4,03	Costa (2012) ⁶⁷	0	100	1.986
Areia	1.500	0,05	Tavares (2006)	0,015	Stachera e Casagrande (2007) ⁶⁸	0,44	40	613
brita	1.250	0,026	Rosa (2010)	0,00275	Souza (2012)	0,38	40	39
Cal	1.500	4,296	Bajay e Sant'ana (2010)	0,81	Hidratada_Costa (2012) ⁶⁹	0,36	102	1.372
Cerâmica (piso)	1.900	5,1	Tavares (2006)	0,269	Coelho (2009) ⁷⁰	0,14	162	54
Cerâmica (telha)	1.900	5,4	Tavares (2006)	0,42	Pereira (2014) ⁷¹	0,1	151	154
Cerâmica (tijolo)	1.600	2,96	Manfredini (2003) ⁷²	0,29	Taborianski e Prado (2012)	0,13	77	60
Cimento CP II	1.200	2,46	Carvalho (2002)	0,565	Carvalho (2002)	0,56	102	350
Concreto	2.300	1,2	Tavares (2006)	0,14	Caldas et al. (2015) ⁷³	0,09	42	49
Madeira (estrut. telhado) (aserrada bruta e aplanada-nativa)	675	1,38	Garcia (2014) ⁷⁴	16,149	Garcia (2014)	0,1	37	1.652
Madeira (portas internas) (Acabada plantada)	675	12,71	Garcia (2014)	0,196	Garcia (2014)	0	31	1.971
Madeira (estrutura forro) (aserrada bruta e aplanada - plantada)	675	7,86	Garcia (2014)	0,092	Garcia (2014)	0,1	37	1.652
Forro madeira (Acabada plantada)	510	12,71	Garcia (2014)	0,196	Garcia (2014)	0,10	23	1971
PVC (forro)	1.300	80	Tavares (2006)	0,553	Costa (2012) ⁷⁵	0,05	56	587
Selador (paredes externas e internas) e tinta esmalte (portas internas)	0,0013	98,10	Tinta à óleo_Tavares (2006)	0,7	Tavares (2006)	0,17	28	30
Tinta acrílica (paredes ext.)	0,0013	61	Tinta acrílica_Tavares (2006)	0,7	Tavares (2006)	0,17	28	30
Tinta PVA látex (paredes int.)	0,0013	65	Tinta PVA látex_Tavares (2006)	0,7	Tavares (2006)	0,17	28	30
Vidro	2.500	18,5	Vidro plano_Tavares (2006)	0,83	Vidro plano_Taborianski Prado (2011)	0	83	1.160

⁶⁷ Dado do nível básico do método no método QE – CO₂ sem contabilizar transporte com base na referência.

⁶⁸ Base na referência adaptado a kgCO₂/kg considerando a densidade de massa aparente média da areia segundo a NBR 15220-2.

⁶⁹ Dado do nível básico do método no método QE – CO₂ sem contabilizar transporte com base na referência.

⁷⁰ Considera o valor máximo para emissão de CO₂ na produção de revestimentos cerâmicos conforme a referência.

⁷¹ Cálculo com base nos dados encontrados na referência.

⁷² Valor da média ponderada das indústrias grandes segundo levantamento realizado pelo autor.

⁷³ Baseado no método de Costa (2012) QE – CO₂ – nível básico. A etapa de transporte foi desconsiderada.

⁷⁴ Os valores aqui apresentados de Garcia (2014) correspondem aos valores da mediana estimada pela autora na sua pesquisa.

⁷⁵ Dado do nível básico do método no método QE – CO₂ sem contabilizar transporte com base na referência.

H.7 (Continuação)

	Densid. (kg/m ³)	Energia incorpor. (MJ/kg)	Fonte energia incorporada	Emiss. (kgCO ₂ / kg)	Fonte Emissões	Desperdício (%)	Distância transporte (km)	
							SP	Salv.
Madeira estrutura paredes (plantada)	675	12,71	Garcia (2014)	0,196	Garcia (2014)	10	37	1.652
Madeira para paredes (plantada)	600	12,71	Garcia (2014)	0,196	Garcia (2014)	10	112	1.970
Telha metálica (aço)	7800	33,8	Tavares (2006)	1,82	Costa (2012) ⁷⁶	11	31	791
Isolante lã de rocha	110	11,7	Habib (2014) ⁷⁷	1,44	Habib (2014) ⁷⁸	10	38	1.991
EPS_Poliestireno expandido (laje forro)	25	88,6	ICE Bath (2011)	2,55	ICE Bath (2011)	10	99	1.845
Argamassa (laje forro)	1950	0,64	Silva (2013b)	0,116	Silva (2013b)	116	43	63

⁷⁶ Dado do nível básico do método no método QE – CO₂ sem contabilizar transporte com base na referência.

⁷⁷ Cálculo conforme dados da referência.

⁷⁸ Cálculo conforme dados da referência.

H.8. Custos e vida útil dos materiais iniciais do caso base na cidade de São Paulo

Serviço	Item Componente	Vida útil do projeto em anos	Fator de reposição do material ⁷⁹	Subitem / Camadas	Materiais (i)	Código SINAPI	Preço SP Março 2016	Unidade preço	Quantidade inicial do projeto na unidade do preço	Preço Insumos (ano 0) (R\$)
1. serviço estrutura	1.1 item: estrutura	50	0	Concreto	concreto	34492	219,21	m ³	0,92	200,60
		50	0	Massas de assentamento (reboco + chapisco + argamassa)	cimento	1379	0,48	kg	61,01	29,28
		50	0		cal_hidratada	1106	0,45	kg	76,26	34,32
		50	0		areia_média	370	59,00	m ³	0,31	18,00
2. serviço alvenaria	2.1 item: paredes externas	40	0,25	Tijolo 6 furos	ceramica_tijolo	7267	0,31	Unid.	2.323,9	720,41
		40	0,25	Massas de assentamento (reboco + chapisco + argamassa)	cimento	1379	0,48	kg	513,79	246,62
		40	0,25		cal_hidratada	1106	0,45	kg	756,32	340,34
		40	0,25		areia	370	59,0	m ³	2,72	160,54
	2.2 item: paredes internas	20	1,5	Tijolo	ceramica_tijolo	7267	0,31	Unid.	768,77	238,32
		20	1,5	Massas de assentamento (reboco+chapisco+ argamassa)	cimento	1379	0,48	kg	169,97	81,59
		20	1,5		cal_hidratada	1106	0,45	kg	250,20	112,59
		20	1,5		areia_média	370	59,00	m ³	0,90	53,11
3. serviço cobertura	3.1 item: cobertura-telhamento	20	1,5	Telhado	ceramica_telha	7176	1,30	Unid.	1.680,90	2.185,17
	3.2 item: cobertura-forro	20	1,5	Forro	PVC	11587	35,00	m ²	39,74	1.390,90
		20	1,5	Estrutura em madeira para forro	madeira estrutura forro	4460	12,56	m ²	39,74	499,13
3.3 item: cobertura: estrutura	30	0,67	Estrutura para telhado	madeira estrutura telhado	92539	41,64	m ²	60,28	2.510,06	
4. serviço piso	4.1 item: revestimento piso	17	1,94	Piso	cerâmica_piso	1289	24,38	m ²	39,74	968,86
	4.3 item: laje de piso	50	0,00	Argamassa de regularização	cimento	1379	0,48	kg	158,96	76,30
		50	0,00		areia_média	370	59,00	m ³	0,66	39,08
		50	0,00	Contrapiso em concreto	concreto	34492	219,21	m ³	1,99	435,57
50	0,00	Brita	brita	4718	54,47	m ³	1,19	64,94		

⁷⁹

Fator de reposição do material igual à: $((\text{Vida útil do edifício em anos} / \text{Vida útil do componente em anos}) - 1)$.

Apêndice H.8 (Continuação)

Serviço	Item Componente	Vida útil do projeto em anos	Fator de reposição do material	Subitem / Camadas	Materiais (i)	Código SINAPI	Preço SP Março 2016	Unidade preço	Quantidade inicial do projeto na unidade do preço	Preço Insumos (ano 0) (R\$)
5. serviço esquadrias	5.1 item: janelas	30	0,67	Janelas em alumínio	alumínio		2.756,86 ⁸⁰		1,00	2.756,86
	5.3 item: portas externas	30	0,67	Portas externas em alumínio	alumínio	4914	616,76	m ²	3,36	2.072,31
	5.4 item: portas internas	20	1,50	Porta internas em madeira	madeira portas	10555	79,21	Unid.	3,00	237,63
6. serviço pintura	6.1 item: pintura selador (paredes externas)	40	0,25	Pintura para paredes externas (Selador)	selador para paredes e teto	6085	6,43	L	21,39	137,55
	6.4 item: pintura paredes externas	7	6,14	Pintura para paredes externas (Tinta)	tinta acrílica paredes externas	7356	16,17	L	16,40	265,19
	6.2 item: pintura selador (paredes internas)	20	1,50	Pintura para paredes internas (Selador)	selador para paredes e teto	6085	6,43	L	6,56	42,21
	6.5 item: pintura paredes internas	5	9,00	Pintura para paredes internas (Tinta)	tinta PVA látex paredes internas	7345	13,97	L	10,07	140,62
	6.9 item: pintura portas internas	5	9,00	Pintura para esquadrias	tinta esmalte portas internas	7311	19,40	L	1,65	32,00
								TOTAL insumos São Paulo (R\$) (ano 0)		16.090,1

⁸⁰ O custo das janelas já inclui o vidro.

H.9. Materiais iniciais (em kg) para o caso base e as alternativas analisadas em São Paulo e Salvador

Material	(Material inicial em kg)								
	Caso base São Paulo e Salvad.	Casos São Paulo				Casos Salvador			
		caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4
Concreto	6.674,83	4.570,10	11.482,58	6.674,83	33.271,40	4.570,10	4.570,10	6.674,83	11.482,58
Cimento	903,73	158,96	943,29	1.051,54	392,59	158,96	158,96	908,79	908,79
Cal	1.082,78		1.484,19	1.620,86	292,03			1.095,43	1.095,43
Areia	6.882,90	993,50	7.278,56	8.361,02	2.745,69	993,50	993,50	6.933,51	6.933,51
Cerâmica tijolo	5.753,85		7.727,92	12.756,21				6.034,50	6.034,50
Cerâmica telha	3.361,80		3361,80				3361,80		3.361,80
PVC	75,90							75,90	
Madeira estrutura telhado	878,88	878,88	878,88	878,88	878,88	878,88	878,88	878,88	878,88
Cerâmica piso	755,06	755,06	755,06	755,06	755,06	755,06	755,06	755,06	755,06
Brita	1.490,25	1.490,25	1.490,25	1.490,25	1.490,25	1.490,25	1.490,25	1.490,25	1.490,25
Alumínio esquadrias	85,53	114,10	100,57	100,57	133,93	141,67	122,72	141,67	141,67
Vidro	48,72	48,72	48,72	48,72	58,88	63,20	63,20	63,20	63,20
Madeira portas	92,75	92,75	92,75	92,75	92,75	92,75	92,75	92,75	92,75
Tinta paredes + teto	70,75	79,20	83,15	79,20	83,15	79,20	79,20	70,75	83,15
Tinta portas	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
Madeira estrutura forro PVC	134,12							134,12	
Madeira estrutura (inclui estrutura+estrutura paredes)		1.191,96				1.191,96	1.191,96		
Madeira paredes		3.116,55				3.116,55	3.116,55		
Isolante lã de rocha (inclui cobertura e paredes)		769,72	246,46	246,46	460,61	769,72	769,72	246,46	246,46
Telha metálica		327,78		327,78	327,78	327,78		327,78	
Forro madeira (inclui estrutura forro)		336,80		336,80		336,80	336,80		
EPS (laje forro)			57,03		57,03				57,03
Argamassa (laje forro)			774,93		774,93				774,93
TOTAL	28.293,99	14.926,47	36.808,27	34.823,07	41.817,09	14.968,52	17.983,59	25.926,02	34.402,12

H.10. Custos materiais casos 1 a 4 em São Paulo com base no SINAPI de março 2016

Item-componente material	Geral		CASO 1 SP		CASO 2 SP		CASO3 SP		CASO 4 SP	
	código SINAPI	unidade preço	quantidade total material	Preço insumo ano 0 (R\$)	quantidade material	Preço insumo ano 0 (R\$)	quantidade material	Preço insumo ano 0 (R\$)	quantidade material	Preço insumo ano 0 (R\$)
Estrutura_concreto	34492	m³			0,92	200,60	0,92	200,60		
Estrutura_cimento	1379	kg			61,01	29,28				
Estrutura_cal	1106	kg			76,26	34,32				
Estrutura_areia	370	m³			0,31	18				
Paredes_concreto	34492	m³							10,39	2.277,27
Paredes_tijolo 6 fur.	7267	Unid.					6,857	2.125,48		
Paredes_tijolo 9 fur.	34781	Unid.			2,344	2.249,21				
Paredes_cimento	1379	kg			723,32	347,2	892,58	428,44	233,63	112,14
Paredes_cal	1106	kg			1.407,9	633,57	1.620,8	729,38	292,03	131,41
Paredes_areia	370	m³			3,89	229,22	4,91	289,79	1,17	68,92
Estrutura_madeira	3997	m³	0,79	1.619,15						
Paredes_madeira	11132	m²	103,91	4.417,2						
Paredes_madeira estrutura	3997	m³	0,98	2.012,9						
Paredes_lã de rocha	outro	m²	95,14	2.487,86					77,88	1.730,38
Cob_telha cerâmica	7176	Unid.			1,681	2.185,17				
Cob_telha metálica	14171	m²	64,65	3.633,33			64,65	3.633,33	64,65	3.633,33
Cob_lã de rocha	Outro	m²	44,81	1.171,78	44,81	1.171,78	44,81	1.171,78	44,81	1.171,78
Cob_madeira forro	3286/83*	m²	39,74	1.333,67			39,74	1.333,67		
Cob_estrutura em madeira para forro madeira e PVC	4460	m²	39,74	499,13			39,74	499,13		
Cobertura_concreto laje de forro	34492				2,09	458,22			2,09	458,22
Cob_EPS laje forro	3408				2,28	986,57			2,28	986,57
Cob_argamassa_laje de forro	36886				774,9	325,47			774,9	325,47
Cob_estrutura madeira telhado	92539	m²	60,28	2.510,06	60,28	2.510,06	60,28	2.510,06	60,28	2.510,06
Piso_cerâmica	1289	m²	39,74	968,86	39,74	968,86	39,74	968,86	39,74	968,86
Piso_Cimento	1379	kg	158,96	76,30	158,96	76,3	158,96	76,30	158,96	76,30
Piso_areia	370	m³	0,66	39,08	0,66	39,08	0,66	39,08	0,66	39,08
Piso_concreto para contrapiso	34492	m³	1,99	435,57	1,99	435,57	1,99	435,57	1,99	435,57
Piso_brita	4718	m³	1,19	64,94	1,19	64,94	1,19	64,94	1,19	64,94
Janelas em alumínio**	Base em fornec.	todas		7.869,46		5.447,7		5.447,70		9.477,24
Portas externas em alumínio	4914	m²	3,36	2.072,31	3,36	2.072,31	3,36	2.072,31	3,36	2.072,31
Porta internas em madeira	10555	unid	3	237,63	3	237,63	3	237,63	3	237,63
Pintura_paredes externas (selador)	6085	litros	21,39	137,55	21,39	137,55	21,39	137,55	21,39	137,55
Pintura_par. externas (tinta acrílica)	7356	litros	16,40	265,19	16,40	265,19	16,40	265,19	16,40	265,19
Pintura_paredes internas (selador)	6085	litros	6,56	42,21	6,56	42,21	6,56	42,21	6,56	42,21
Pintura_paredes internas (PVA)	7345	litros	10,07	140,62	10,07	140,62	10,07	140,62	10,07	140,62
Pintura_portas internas (esmalte)	7311	litros	1,65	32	1,65	32	1,65	32	1,65	32
Pintura_forro madeira (esmalte)	7311	litros	6,50	126,16			6,5	126,16		
Pintura_forro laje (PVA)					9,54	133,24			9,54	133,24
Total insumos (ano 0)				32.192,9		21.976,4		23.007,8		27.528,3

H.11. Custos materiais casos 1 a 4 em Salvador com base no SINAPI de março 2016

Item-componente material	Geral		CASO 1 Salvador		CASO 2 Salv.		CASO3 Salvador		CASO 4 Salvador	
	código SINAPI	unidade preço	quantidade material	Preço final do insumo (R\$)	quantidade material	Preço final do insumo (R\$)	quantidade material	Preço final do insumo (R\$)	quantidade material	Preço final do insumo (R\$)
Estrutura_concreto	34492	m³					0,92	263,53	0,92	263,53
Estrutura_cimento	1379	kg					61,01	33,55	61,01	33,55
Estrutura_cal	1106	kg					76,26	67,87	76,26	67,87
Estrutura_areia	370	m³					0,31	20,74	0,31	20,74
Paredes_tijolo 8 furos	38783	Unid.					2.344	1.288,61	2.344	1.289
Paredes_cimento	1379	kg					688,82	378,85	688,82	378,85
Paredes_cal	1106	kg					1.019,18	907,07	1.019,18	907,07
Paredes_areia	370	m³					3,66	248,54	3,66	248,54
Estrutura_madeira	3997	m³	0,79	2.300,89	0,79	2.300,89				
Paredes_madeira	11132	m²	103,91	4.565,75	103,91	4.565,75				
Paredes_madeira estrutura	3997	m³	0,98	2.860,45	0,98	2.860,45				
Paredes_lã de rocha	outro	m²	95,14	2.487,86	95,14	2.487,86				
Cob_telha cerâmica	7176	Unid.			1.681	2017,08			1.681	2.017,08
Cob_telha metálica	14171	m²	64,65	4.021,88			64,65	4.021,88		
Cob_lã de rocha	Outro	m²	44,81	1.171,78	44,81	1.171,78	44,81	1.171,78	44,81	1.171,78
Cob_forro madeira	3286/83*	m²	39,74	1.053,11	39,74	1.053,11				
Cob_forro PVC	11587	m²					39,74	709,76		
Cobertura_estrutura em madeira forro madeira	4460	m²	39,74	709,76	39,74	709,76	39,74	709,76		
Cob_laje concreto	34492								2,09	601,97
Cob_EPS_laje forro	3408								2,28	731,85
Cob_argamassa_laje	36886								774,9	441,71
Cob_estrutura madeira telhado	92539	m²	60,28	3.169,52	60,28	3.169,52	60,28	3.169,52	60,28	3.169,52
Piso_cerâmica	1289	m²	39,74	666,04	39,74	666,04	39,74	666,04	39,74	666,04
Piso_Cimento	1379	kg	158,96	87,43	158,96	87,43	158,96	87,43	158,96	87,43
Piso_areia	370	m³	0,66	45,04	0,66	45,04	0,66	45,04	0,66	45,04
Piso_concreto para contrapiso	34492	m³	1,99	572,22	1,99	572,22	1,99	572,22	1,99	572,22
Piso_brita	4718	m³	1,19	65,69	1,19	65,69	1,19	65,69	1,19	65,69
Janelas alumínio**		todas		12.983,6		5.562,52		12.983,6		12.983,6
Portas externas em alumínio	4914	m²	3,36	1.948,23	3,36	1.948,23	3,36	1.948,23	3,36	1.948,23
Porta internas em madeira	10555	unid	3	203,91	3	203,91	3	203,91	3	203,91
Pintura_paredes externas (selador)	6085	litros	21,39	146,96	21,39	146,96	21,39	146,96	21,39	146,96
Pintura_paredes ext. -tinta acrílica	7356	litros	16,40	272,74	16,40	272,74	16,40	272,74	16,40	272,74
Pintura_paredes internas (selador)	6085	litros	6,56	45,10	6,56	45,10	6,56	45,10	6,56	45,10
Pintura_paredes internas (PVA)	7345	litros	10,07	144,64	10,07	144,64	10,07	144,64	10,07	144,64
Pintura_portas internas (esmalte)	7311	litros	1,65	32,56	1,65	32,56	1,65	32,56	1,65	32,56
Pintura_forro madeira (esmalte)	7311	litros	6,50	128,37	6,50	128,37				
Pintura_forro laje PVA									9,54	137,06
TOTAL INSUMOS (ano 0)				39.645,2		30.257,6		31.245,8		28.655,6

Notas Apêndice H.11 e H.12: 1.Na Tabela as quantidades e custos são dos materiais, mas para uma mais fácil identificação estão colocados por serviço e depois material. Ex: Estrutura_cimento.

2. *O custo do forro é uma média do SINAPI códigos 3283 a 3286.

3. ** O custo das janelas é com base em fornecedores e inclui o vidro e venezianas conforme descrição do caso avaliado.

ANEXO A. VALORES ADOTADOS PARA DESPERDÍCIO

Material	Indicadores globais de perdas por material				
	Mediana (Valor adotado)	Média	Mínimo	Máximo	Referência
Aço	0,11	0,1	0,04	0,16	Agopyan et al. (1998)
Alumínio (portas e janelas)	0				
Areia	0,44	0,76	0,07	3,11	Agopyan et al. (1998)
Argamassa parcial ou totalmente produzida fora do canteiro	1,16	1,16	0,26	2,05	Agopyan et al. (1998)
Argamassa parcial ou totalmente produzida fora do canteiro chapisco	0,21	0,21	0,14	0,29	Agopyan et al. (1998)
Argamassa parcial ou totalmente produzida fora do canteiro contrapiso	0,42	0,42	0,36	0,47	Agopyan et al. (1998)
Argamassa parcial ou totalmente produzida fora do canteiro emboço ou massa única	0,9	0,99	0,05	2,09	Agopyan et al. (1998)
Argamassa parcial ou totalmente produzida fora do canteiro reboco	0,13	0,13	0,13	0,13	Agopyan et al. (1998)
Argamassa produzida em obra	0,18	0,18	0,18	0,18	Agopyan et al. (1998)
Blocos e tijolos	0,13	0,17	0,03	0,48	Agopyan et al. (1998)
Cal	0,36	0,97	0,06	6,38	Agopyan et al. (1998)
Cerâmica (placa)	0,14	0,16	0,02	0,5	Agopyan et al. (1998)
Cerâmica (telha)	0,1				Souza et al. (2006)*
Cimento	0,56	0,95	0,06	6,38	Agopyan et al. (1998)
Concreto produzido em obra	0,06	0,06	0,06	0,06	Agopyan et al. (1998)
Concreto usinado	0,09	0,09	0,02	0,23	Agopyan et al. (1998)
EPS	0,05				Base na TCPO
Gesso	0,3	0,45	-0,14	1,2	Agopyan et al. (1998)
Isolante lã de rocha	0,05				Base em fornecedores
Madeira (estrutura/painéis)	0,1				base em fornecedores
Madeira (portas)	0				Base em fornecedores
Pedra	0,38	0,75	0,09	2,94	Agopyan et al. (1998)
PVC (forro)	0,05				Base em fornecedores
Saibro	1,74	1,82	1,34	2,47	Agopyan et al. (1998)
Tintas	0,17	0,16	0,08	0,24	Agopyan et al. (1998)
Vidro (esquadrias)	0				Base em fornecedores

Notas: 1. Para a telha cerâmica foi adotada a mesma porcentagem de desperdício dos blocos e tijolos; para as portas e janelas adotado 0% de perda por conta do material já chegar pronto na obra e, para a estrutura da madeira do telhado, foi adotado o valor de 10%.

2. A maior parte dos dados é com base em Agopyan (1998).