

Miguel Teixeira Gomes Pacheco

**VENTILAÇÃO NATURAL E CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL: CRÍTICA  
AO MODELO SUPERISOLADO PARA RESIDÊNCIA DE ENERGIA ZERO  
EM BELÉM E CURITIBA.**

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: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Florianópolis  
2013

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

Pacheco, Miguel Teixeira Gomes

Ventilação natural e climatização artificial : crítica ao modelo superisolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba / Miguel Teixeira Gomes Pacheco ; orientador, Roberto Lamberts - Florianópolis, SC, 2014. 320 p. ; 21cm

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

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Edifícios de Energia Zero. 3. Eficiência energética. 4. Conforto térmico. 5. Climas quentes. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Miguel Teixeira Gomes Pacheco

**VENTILAÇÃO NATURAL E CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL: CRÍTICA  
AO MODELO SUPERISOLADO PARA RESIDÊNCIA DE ENERGIA ZERO  
EM BELÉM E CURITIBA.**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 27 de junho de 2013.

-----  
Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Dr.  
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

-----  
Prof. EneDir Ghisi, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina

-----  
Prof. Ricardo Rüther, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina

-----  
Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

-----  
Prof. Aldomar Pedrini, PhD.  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

-----  
Prof. Gilberto De Martino Jannuzzi, PhD.  
Universidade Estadual de Campinas

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Roberto Lamberts, pela política de portas abertas e a exigência acadêmica.

Aos membros da banca de qualificação e defesa pela disponibilidade para avaliar o trabalho.

À Eletrobrás e CAPES por financiarem esta pesquisa.

Às fundações universitárias FEESC e FUSP.

A todos os colegas do LabEEE, passados e presentes.

Aos fotovoltaicos: por todas as ajudas sobre a magia de converter fótons em elétrons.

Especiais agradecimentos: Marcio, Clau, Rê, Cacau, Rogério.

Aos núcleos: Solar Decathlon, jurídico, vaniano, burguês, yogi e ogro da novela.

Aqueles que escutam o silêncio em cachoeiras ruidosas.

À Gi e Bebe.

Aos meus Pais e Irmã.

À Ju.

A era da energia barata acabou. A única questão agora é saber se a renda extra da energia mais valiosa irá para um círculo cada vez menor de produtores ou será dirigida de volta para as economias domésticas dos consumidores, com os benefícios de maior sustentabilidade ambiental?

Nobuo Tanaka - Diretor Executivo da Agencia Internacional de Energia, 2011

## RESUMO

A atual sociedade tecnológica depende dos combustíveis fósseis. O petróleo, em particular, é crucial na produção agrícola e industrial. O início do esgotamento do petróleo, somado à mudança climática, força uma transição energética para uma matriz renovável. Tal transição acarreta custos acrescidos de energia que afetam a sociedade como um todo e dos cidadãos privados em particular. O setor das edificações é o maior consumidor mundial de energia. Deste contexto, surgiram políticas de promoção aos edifícios de energia zero (EEZ). Os EEZ geram a energia que consomem através de meios próprios de geração renovável. As residências unifamiliares apresentam condições técnicas ótimas para a implantação de EEZ, com o potencial de proteger os cidadãos privados dos efeitos do aumento do custo de energia. Uma revisão da literatura mostra uma variedade de distintas e opostas definições de EEZ que dependem dos objetivos de energia política. A revisão mostra também as diferenças marcadas da matriz energética, usos finais de energia e contexto climático brasileiro, comparados com os países desenvolvidos. A literatura mostra a importância do consumo energético em climatização para os EEZ. É constatado um viés para adoção de soluções de climas frios na literatura, baseados no paradigma superisolado, sendo necessário testar a validade de tais estratégias no Brasil, onde o calor predomina. Esse viés por climas frios estende-se à avaliação de conforto térmico, que opta por modelos estáticos como a ISO 7730, em contrapartida de modelos adaptativos, como o presente na ASHRAE 55. Duas filosofias distintas para obtenção de conforto térmico são avaliadas por simulação termo energética computacional para Belém e Curitiba. Um sistema baseado em climatização artificial do ar e superisolamento, isolando os usuários do exterior. O segundo baseia-se na otimização da ventilação natural e no uso do modelo adaptativo de conforto térmico da ASHRAE 55 em contato com o meio externo. Os sistemas são avaliados em uma residência unifamiliar baseada na Eko House, o projeto da equipe brasileira que participou no Solar Decathlon Europe 2012. O desempenho é avaliado sobre diferentes condições de transmitância térmica, sombreamento e operação. Estratégias de otimização como uso de recuperação de calor sensível e latente e uso de operação adaptativa são testadas e avaliadas para conforto térmico e consumo energético. Em Belém, o sombreamento de áreas transparentes e parede e baixa transmitância térmica garantem

condições de conforto térmico para ventilação natural e menores consumos energéticos com a climatização artificial. Para Curitiba, o não sombreamento de áreas transparentes e paredes com menor transmitância térmica reduz o desconforto térmico para ventilação natural, mas não garante condições mínimas de conforto. Para a climatização artificial, sombreamento de áreas transparentes e parede com menores transmitância térmicas implicam em menores consumos energéticos. A recuperação de calor não mostra garantir os menores consumos energéticos. Melhor desempenho térmico reduz milhares graus hora de desconforto térmico por ano e o consumo energético anual em milhares de kWh, impactando a capacidade do sistema de geração fotovoltaico.

**Palavras-chave:** Edifícios de Energia Zero. Climas quentes. Conforto térmico. Eficiência energética.

## ABSTRACT

The current technological society depends on fossil fuels. Oil, in particular, is crucial in agricultural and industrial production. The start of oil depletion, coupled with climate change, force a transition to a renewable energy mix. This transition increases energy costs, which affects society in general and private citizens in particular. The building sector is the world's largest consumer of energy. From this context arisen policies promoting the Zero Energy Buildings (ZEB). The ZEB generate the energy they consume by its own renewable energy generation system. The single-family residential show optimal technical conditions for ZEB implantation, with the potential to protect private citizens from the literature review shows a variety of distinct and opposed ZEB definitions, which rest on energy policy aims. The review also shows distinct differences in energy mix, energy end uses and Brazilian climatic context compared with developed countries.

The literature shows the importance of energy consumption in climatization for ZEB. The review shows a bias towards cold climates, being necessary to test the validity of such strategies in Brazil, where heat is predominant. Such cold climate bias extends to thermal comfort evaluation that opts for static models as ISO 7730 instead of adaptive models as presented in ASHRAE 55. A comparison between the performance in thermal comfort and energy consumption of two systems for thermal comfort for Belém and Curitiba. One system is an artificial climatization and superinsulation, secluding users from the outdoors. The second system based on optimization of natural ventilation and use of ASHRAE 55 adaptive model of thermal comfort. Application of both systems to a single-family residence based on Eko House, the Brazilian team project that competed in Solar Decathlon Europe 2012. Performance evaluated under different condition of thermal transmittance, shadowing and operation. Optimization strategies as energy ventilation recovery and dynamic setpoint temperature dead bands are tested and evaluated. In Belém, shadowing of transparent areas and wall coupled with low thermal transmittance, guarantee thermal comfort conditions for natural ventilation and lower energy consumption for artificial air conditioning. In Curitiba, disregarding shadowing of transparent areas and walls, with low thermal transmittance, reduces thermal comfort but does not ensure minimal thermal comfort conditions. For

artificial climatization, shadowing of transparent areas and walls with low thermal transmittance, result in lower energy consumptions. Heat and energy recovery does not show to guarantee lower energy consumptions. Better thermal performance reduces both thousands of degree hours and kWh of energy consumption per year, influencing the capacity of the photovoltaic energy generation system.

**Keywords:** Zero Energy Buildings. Energy Efficiency. Thermal Comfort. Hot Climates.

## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1: Eko House durante a competição em Madri em 2012. ....   | 31  |
| Figura 2: MIT Solar House I a IV. Fonte: Parker (2009). ....  | 54  |
| Figura 3: Exemplo de casa solar passiva. Fonte: Holladay (2010). ....   | 55  |
| Figura 4: Foto da Nullenergihuset. Fonte: Holladay (2010). ....   | 56  |
| Figura 5: Figura da Lo-Cal House. Parker (2009).....  | 57  |
| Figura 6: Saskatchewan Conservation House. Parker (2009) .....  | 57  |
| Figura 7: Foto da Leger Superinsulated House. Parker (2009) .....   | 58  |
| Figura 8: Esquema de sistema de recuperação de calor de ventilação.<br>.....  | 73  |
| Figura 9: Ilustração esquemática do trocador de calor de contra fluxo.<br>Adaptado de Min e Su (2010).....  | 74  |
| Figura 10: Ilustração de sistema de recuperação de calor balanceado<br>operando para recuperação de calor no inverno. ....                          | 75  |
| Figura 11: Exemplo de configuração interna de elemento de trocador<br>de calor. ....  | 83  |
| Figura 12: Fotografia da Casa Hathaway. Fonte: Parker (2009). ....  | 88  |
| Figura 13: Usos finais de energia na Casa Hathaway. Fonte: Parker<br>(2009).....  | 89  |
| Figura 14: Consumo elétrico de uma residência unifamiliar ao longo<br>de vinte anos. Fonte: Meier (2011). ....                                      | 91  |
| Figura 15: Limites aceitáveis para intervalos de temperatura<br>operativa em espaços naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE<br>55 (2010).....    | 96  |
| Figura 16: Exemplo de intervalo de conforto adaptativo com equação<br>exponencial para o mês de janeiro em Curitiba. ....                           | 98  |
| Figura 17: Exemplo de graus-hora com limites de conforto constantes<br>para o mês de janeiro em Curitiba. ....                                      | 101 |
| Figura 18: Exemplo de graus-hora com limites de conforto variáveis<br>definidas por conforto adaptativo para o mês de janeiro em Curitiba.<br>..... | 102 |
| Figura 19: Usos finais de eletricidade médios diários do edifício de<br>energia zero em Queensland.....   | 105 |
| Figura 20: Comparação de funcionamento de sistema de<br>condicionamento normal com sistema utilizado no ZER. ....                                   | 106 |
| Figura 21: Localização de difusores de ar no piso do edifício ZER....   | 107 |
| Figura 22: Ilustração de funcionamento das entradas de ar nos postos<br>de trabalho utilizadas no edifício ZER. ....                                | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 23: Edifício Enerpos na ilha de Reunião.....   | 109 |
| Figura 24: Ilustração de períodos de atuação dos sistemas de climatização.....  | 110 |
| Figura 25: Ilustração de estratégias utilizadas no Enerpos. Fonte: Lenoir e al. (2011).....   | 111 |
| Figura 26: Balanços energéticos mensais da casa eficiente para diferentes perfis de consumo. Fonte: Lamberts e al. (2010).....  | 117 |
| Figura 27: Geração de energia primária brasileira de fontes renováveis e não renováveis de 1970 a 2012. ....  | 118 |
| Figura 28: Participação das fontes não renováveis na produção de energia primária na matriz energética brasileira. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2013). .... | 118 |
| Figura 29: Participação das fontes renováveis na produção de energia primária na matriz energética brasileira. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2013). ....     | 119 |
| Figura 30: Parcela da eletricidade no consumo energético residencial brasileiro de 1970 a 2012.....   | 121 |
| Figura 31: Comparação da Eko House e da geometria do modelo de simulação. ....  | 131 |
| Figura 32: Ilustração das duas zonas térmicas. Fonte: autor.....  | 132 |
| Figura 33: Indicação das áreas transparentes. Fonte: autor.....   | 134 |
| Figura 34: Detalhe da esquadria da Eko House e modelo de simulação da tese. ....  | 141 |
| Figura 35: Padrão de ocupação. Fonte: autor. ....   | 143 |
| Figura 36: Potência de iluminação instalada por área funcional. Fonte: autor. ....  | 143 |
| Figura 37: Padrão de uso do sistema de iluminação. Fonte: autor.....  | 145 |
| Figura 38: Padrão de uso dos equipamentos. Fonte: autor. ....   | 148 |
| Figura 39: Ilustração das três opções de sombreamento. Fonte: autor. ....   | 154 |
| Figura 40: Ilustração das seções de parede na fachada sul. Fonte: autor. ....   | 155 |
| Figura 41: Ilustração de aplicação de opção nosun para simulação da opção de sombreamento parcial na fachada sul. Fonte: autor.....                                   | 155 |
| Figura 42: Representação das seções de parede no modelo de simulação. Fonte: autor.....   | 156 |
| Figura 43: Esquema do sistema de recuperação de calor sensível e latente. ....  | 173 |

Figura 44: Exemplo de perfis de temperatura para dia com maior amplitude de graus hora de frio no nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo..... 210



## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1: Hierarquia das opções de fontes energia renovável para uso de edifício de energia zero. ....            | 45  |
| Tabela 2: Síntese dos usos finais propostos para serem incluídos no balanço energético. ....                      | 48  |
| Tabela 3: Especificações para <i>Passivhaus</i> no clima centro europeu....                                       | 60  |
| Tabela 4: Evolução da definição da norma <i>Passivhaus</i> . ....   | 64  |
| Tabela 5: Resumo dos arquivos climáticos e programas de simulação utilizados no programa <i>Passive On</i> . .... | 66  |
| Tabela 6: Resumo dos parâmetros nacionais sugeridos no programa <i>Passive On</i> . ....                          | 67  |
| Tabela 7: Estratégias bioclimáticas propostas no programa <i>Passive On</i> . ....                                | 70  |
| Tabela 8: Poluentes mais comuns do ar interno e suas fontes. ....   | 76  |
| Tabela 9: Síntese dos estudos de usos finais de energia residenciais brasileiros. ....                            | 122 |
| Tabela 10: Áreas e orientação das áreas transparentes. ....   | 134 |
| Tabela 11: Dados térmicos e óticos dos panos de vidro. ....   | 138 |
| Tabela 12: Dados de entrada para a câmara de ar do vidro duplo....  | 139 |
| Tabela 13: Propriedades das áreas transparentes com vidro duplo da Eko House e modelo de simulação. ....          | 140 |
| Tabela 14: Síntese do cálculo de resistência térmica equivalente da esquadria por seções. ....                    | 142 |
| Tabela 15: Descrição do sistema de iluminação. ....   | 144 |
| Tabela 16: Equipamentos das zonas condicionadas. ....   | 147 |
| Tabela 17: Dados climáticos mensais de Belém. ....  | 150 |
| Tabela 18: Dados climáticos mensais de Curitiba. ....   | 151 |
| Tabela 19: Resumo das transmitâncias térmicas das superfícies dos diferentes níveis de envelope. ....             | 156 |
| Tabela 20: Parâmetros e critérios para análise de resultados da primeira etapa. ....                              | 158 |
| Tabela 21: Dados geométricos e térmicos dos brises horizontais....  | 162 |
| Tabela 22: Dados geométricos e térmicos dos brises verticais. ....  | 163 |
| Tabela 23: Temperaturas mensais de controle de sombreamento para Belém. ....                                      | 164 |
| Tabela 24: Temperaturas mensais de controle de sombreamento para Curitiba. ....                                   | 165 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 25: Parâmetros e critérios para análise de resultados da segunda etapa.....   | 166 |
| Tabela 26: Síntese das estratégias de otimização da terceira etapa. ....   | 167 |
| Tabela 27: Temperaturas de controle de abertura das áreas transparentes para Belém. ....   | 168 |
| Tabela 28: Temperaturas de controle de abertura das áreas transparentes para Curitiba. ....  | 169 |
| Tabela 29: Discriminação das taxas de renovação do ar mecânica e de infiltração simuladas.....   | 172 |
| Tabela 30: Parâmetros para o recuperador de calor sensível e latente para a zona térmica 1.....  | 175 |
| Tabela 31: Parâmetros para o recuperador de calor sensível e latente para a zona térmica 2.....  | 176 |
| Tabela 32: Parâmetros de gerais de operação de recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2.....                                 | 178 |
| Tabela 33: Conversão de unidades para as taxas de renovação de ar simuladas na recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2..... | 179 |
| Tabela 34: Parâmetros para simulação de infiltração. ....  | 180 |
| Tabela 35: Parâmetros utilizados no objeto EnergyRecovery:Controller. ....   | 182 |
| Tabela 36: Parâmetros de controle dos ventiladores de recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2. ....                         | 183 |
| Tabela 37: Definição listas de conexão da recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2.....                                      | 184 |
| Tabela 38: Definição de prioridade de atuação da recuperação de calor sensível e latente e do fluido de refrigerante variável.....                       | 185 |
| Tabela 39: Definição de nós de entrada de ar do exterior nas zonas térmicas 1 e 2.....   | 186 |
| Tabela 40: Definição de listas de nós dos sistemas de condicionamento para as zonas térmicas 1 e 2.....  | 187 |
| Tabela 41: Parâmetros e critérios para análise de resultados da terceira etapa. ....   | 188 |
| Tabela 42: Soma anual de graus hora de desconforto térmico para a ventilação natural automática em Belém.....  | 192 |
| Tabela 43: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 2 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Belém.....            | 196 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 44: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 2 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Belém.....                 | 196 |
| Tabela 45: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Belém.....             | 197 |
| Tabela 46: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Belém.....                 | 198 |
| Tabela 47: Comparação dos consumos anuais para a ventilação natural automática em Curitiba. ....  | 199 |
| Tabela 48: Somas anuais de graus hora desconforto térmico de calor e frio para a ventilação natural automática em Curitiba .....                          | 199 |
| Tabela 49: Amplitude e frequência mensais de graus hora de calor para o nível 1 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba .....    | 202 |
| Tabela 50: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 1 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba.....      | 203 |
| Tabela 51: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 1 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Curitiba.....  | 205 |
| Tabela 52: Amplitude e frequência mensais de graus hora de calor para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Curitiba..... | 206 |
| Tabela 53: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Curitiba.....  | 207 |
| Tabela 54: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba .....     | 208 |
| Tabela 55: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba.....      | 209 |
| Tabela 56: Consumos anuais para a climatização artificial em Belém.....   | 211 |
| Tabela 57: Comparação dos consumos energéticos anuais de climatização artificial em Curitiba. ....  | 214 |
| Tabela 58: Discriminação dos consumos energéticos anuais do sistema climatização artificial em Curitiba.....  | 216 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 59: Comparação dos desempenhos da ventilação natural automática entre a primeira e segunda etapa para Belém.....                      | 218 |
| Tabela 60: Discriminação dos consumos energéticos anuais de climatização artificial na primeira e segunda etapas em Curitiba. ...            | 219 |
| Tabela 61: Comparação de somas de graus hora mensais e anual entre a entre as três etapas para a ventilação natural automática em Belém..... | 220 |
| Tabela 62: Somas mensais e anuais de graus hora da primeira e terceira etapa da ventilação natural automática em Curitiba .....              | 222 |
| Tabela 63: Consumos totais de climatização com recuperação de calor sensível e latente de ventilação para Belém.....                         | 223 |
| Tabela 64: Discriminação dos consumos de climatização por componentes. ....  | 224 |
| Tabela 65: Discriminação dos consumos energéticos dos ventiladores do sistema de recuperação de calor em Belém .....                         | 225 |
| Tabela 66: Consumo de climatização com demanda reduzida de recuperador de calor sensível e latente.....                                      | 226 |
| Tabela 67: Comparação entre consumos energéticos nas três etapas para fluido de refrigerante variável em Belém.....                          | 227 |
| Tabela 68: Consumos totais de climatização com recuperação de calor sensível e latente de ventilação para Curitiba. ....                     | 228 |
| Tabela 69: Discriminação dos consumos de climatização por componentes para Curitiba. ....  | 229 |
| Tabela 70: Discriminação de consumo energético individual de ventiladores para Curitiba.....   | 230 |
| Tabela 71: Consumo de climatização com demanda reduzida de recuperador de calor sensível e latente.....                                      | 231 |
| Tabela 72: Comparação entre consumos energéticos nas três etapas para fluido de refrigerante variável em Curitiba .....                      | 232 |
| Tabela 73: Discriminação dos consumos energéticos anuais para as três etapas em Curitiba .....   | 233 |
| Tabela 74: Estimativa mensal e anual de geração fotovoltaica para Belém.....   | 235 |
| Tabela 75: Estimativa mensal e anual de geração fotovoltaica para Curitiba .....   | 237 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ach – Air changes per hour  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers  
COP – Coefficient of performance  
EBPD – European Building Performance Directive  
EEZ – Edifício de Energia Zero  
ERV- Energy Recovery Ventilation  
FV/T – Sistema misto fotovoltaico térmico  
ISO – International Standards Organization  
HRV - Heat Recovery Ventilation  
HVAC – Heating Ventilation and Air Conditioning  
IEA – International Energy Agency  
LED – Light-Emitting Diode  
Low-E – Vidro de baixa emissividade  
MHRV - Mechanical Heat Recovery Ventilation  
MIT – Massachusetts Institute of Technology  
OSB – Oriented Strand Board  
Tep – Tonelada equivalente de petróleo  
TRY – Test Reference Year  
V2G – Vehicle to Grid



## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>27</b> |
| 1.1      | TRANSIÇÃO DE MATRIZ ENERGÉTICA .....   | 27        |
| 1.2      | ENERGIA E EDIFICAÇÕES .....  | 27        |
| 1.3      | SOLAR DECATHLON.....   | 30        |
| 1.4      | QUESTÕES ESPECÍFICAS DE EDIFÍCIO DE ENERGIA ZERO NO BRASIL.....  | 32        |
| 1.4.1    | <b>Dúvidas sobre a validade do modelo de climatização eficiente superisolado de climas frios no contexto brasileiro.....</b> | <b>33</b> |
| 1.4.2    | <b>Definição primária de edifício de energia zero perante a matriz energética e usos finais brasileiros .....</b>            | <b>36</b> |
| 1.5      | OBJETIVOS.....   | 37        |
| 1.5.1    | <b>Objetivo geral.....</b>   | <b>37</b> |
| 1.5.2    | <b>Objetivos específicos .....</b>   | <b>37</b> |
| 1.6      | ESTRUTURA DA TESE.....   | 38        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>39</b> |
| 2.1      | ESCOPO ATUAL DA PESQUISA EM EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO .....  | 39        |
| 2.2      | POLÍTICAS NA ÁREA DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO .....   | 39        |
| 2.3      | DEFINIÇÕES PARA EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO.....   | 40        |
| 2.3.1    | <b>Edifícios de Energia Zero e diferentes definições de energia .....</b>  | <b>42</b> |
| 2.3.2    | <b>Edifícios de Energia Zero e geração própria de energia..</b>  | <b>44</b> |
| 2.3.3    | <b>Consumo próprio de energia em Edifícios de Energia Zero.....</b>  | <b>47</b> |
| 2.3.4    | <b>Edifícios de Energia Zero e Transporte.....</b>   | <b>48</b> |
| 2.3.5    | <b>Edifícios de Energia Zero e alimentação .....</b>   | <b>49</b> |
| 2.3.6    | <b>Metodologias para definição de Edifícios de Energia Zero.....</b>   | <b>49</b> |
| 2.3.7    | <b>Definição para o balanço adotada .....</b>  | <b>50</b> |
| 2.3.8    | <b>Período do balanço.....</b>   | <b>50</b> |
| 2.3.9    | <b>Tipos de consumos de energia incluídos no balanço.....</b>  | <b>51</b> |
| 2.3.10   | <b>Tipo de balanço energético .....</b>  | <b>51</b> |
| 2.3.11   | <b>Opções de energia renovável .....</b>   | <b>51</b> |
| 2.3.12   | <b>Interligação com a rede de energia .....</b>  | <b>51</b> |
| 2.3.13   | <b>Requisitos para eficiência energética .....</b>   | <b>52</b> |
| 2.3.14   | <b>Conforto térmico.....</b>   | <b>52</b> |
| 2.3.15   | <b>Interação entre edifício e rede .....</b>   | <b>53</b> |

|        |  |            |
|--------|--|------------|
| 2.4    | EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO COMO EVOLUÇÃO DOS<br>EDIFÍCIOS DE BAIXA ENERGIA.....   | 53         |
| 2.4.1  | <b>Breve introdução aos edifícios de baixa energia.....</b>  | <b>53</b>  |
| 2.4.2  | <b>A consagração dos edifícios superisolados: a norma<br/><i>Passivhaus</i> .....</b>  | <b>58</b>  |
| 2.4.3  | <b>A evolução da definição da norma <i>Passivhaus</i> .....</b>  | <b>63</b>  |
| 2.4.4  | <b>A diferença conceitual entre frio e calor na climatização<br/>de edificações.....</b>   | <b>71</b>  |
| 2.5    | EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO; BAIXA ENERGIA E A<br>RECUPERAÇÃO DE CALOR .....   | 72         |
| 2.5.1  | <b>Introdução aos recuperadores de calor sensível .....</b>  | <b>72</b>  |
| 2.5.2  | <b>Recuperadores de calor sensível e latente e qualidade do<br/>ar interno .....</b>   | <b>76</b>  |
| 2.5.3  | <b>Eficiência e desempenho de recuperação de calor sensível<br/>e recuperação de calor sensível e latente .....</b>                | <b>79</b>  |
| 2.5.4  | <b>Fatores que afetam a eficiência de operação de<br/>recuperadores de calor e calor sensível e latente em<br/>edifícios .....</b> | <b>82</b>  |
| 2.5.5  | <b>Recuperação de calor e calor sensível e latente em climas<br/>quentes .....</b>   | <b>85</b>  |
| 2.6    | ESTUDOS E EXEMPLOS DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO .....  | 87         |
| 2.7    | EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO E PADRÕES DE USO .....   | 90         |
| 2.8    | MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO.....   | 93         |
| 2.8.1  | <b>ASHRAE 55.....</b>  | <b>94</b>  |
| 2.8.2  | <b>Análise crítica da ASHRAE 55.....</b>   | <b>99</b>  |
| 2.8.3  | <b>Cálculo de graus hora de desconforto.....</b>   | <b>100</b> |
| 2.9    | SIMULAÇÕES E MONITORAMENTO DE EDIFÍCIO DE ENERGIA<br>ZERO EM CLIMAS QUENTES.....   | 103        |
| 2.10   | EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO NO CONTEXTO TROPICAL .....   | 106        |
| 2.10.1 | <b>Singapura .....</b>   | <b>106</b> |
| 2.10.2 | <b>Enerpos .....</b>   | <b>108</b> |
| 2.11   | POLÍTICAS ENERGÉTICAS, EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO E<br>EDIFÍCIOS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS NA REDE NO<br>BRASIL.....                 | 112        |
| 2.12   | CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO.....  | 117        |
| 2.12.1 | <b>Setor residencial na matriz energética brasileira.....</b>  | <b>120</b> |
| 2.12.2 | <b>Usos finais de energia nas residências brasileiras. ....</b>  | <b>121</b> |
| 2.12.3 | <b>Aquecimento doméstico de água.....</b>  | <b>123</b> |
| 2.12.4 | <b>Geladeira e freezer .....</b>   | <b>123</b> |
| 2.12.5 | <b>Condicionamento de ar.....</b>  | <b>124</b> |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 2.12.6 | <b>Iluminação</b> .....  | 124 |
| 2.13   | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 125 |
| 3      | <b>MÉTODO</b> .....  | 128 |
| 3.1    | O MODELO DE SIMULAÇÃO .....  | 128 |
| 3.1.1  | <b>Introdução</b> .....  | 128 |
| 3.1.2  | <b>Geometria</b> .....   | 131 |
| 3.1.3  | <b>Sistema fotovoltaico</b> .....  | 135 |
| 3.1.4  | <b>Propriedades térmicas e óticas dos vidros e esquadria das áreas transparentes</b> ..... | 136 |
| 3.1.5  | <b>Padrão de ocupação</b> .....  | 142 |
| 3.1.6  | <b>Descrição do sistema de iluminação e padrão de uso</b> ...                              | 143 |
| 3.1.7  | <b>Descrição dos equipamentos e aquecimento de água doméstica e padrão de uso</b> .....    | 145 |
| 3.1.8  | <b>Cidades simuladas</b> .....   | 149 |
| 3.1.9  | <b>Definição de edifício de energia zero adotada</b> .....                                 | 151 |
| 3.2    | PRIMEIRA ETAPA: ESTUDO PILOTO .....  | 152 |
| 3.2.1  | <b>Sistemas para conforto térmico simulados</b> .....                                      | 152 |
| 3.2.2  | <b>Sistema de ventilação natural automática</b> .....                                      | 152 |
| 3.2.3  | <b>Sistema de climatização artificial</b> .....  | 153 |
| 3.2.4  | <b>Opções de sombreamento</b> .....  | 154 |
| 3.2.5  | <b>Níveis de transmitância térmica</b> .....   | 156 |
| 3.2.6  | <b>Análise de resultados da primeira etapa</b> .....                                       | 158 |
| 3.3    | SEGUNDA ETAPA: ALTERAÇÃO DO ALGORITMO DE SOMBREAMENTO .....                                | 160 |
| 3.3.1  | <b>Descrição da alteração do sombreamento</b> .....  | 160 |
| 3.3.2  | <b>Alteração do sombreamento: ventilação natural automática</b> .....                      | 164 |
| 3.3.3  | <b>Alteração do sombreamento: climatização artificial</b> ....                             | 165 |
| 3.3.4  | <b>Análise de resultados da segunda etapa</b> .....  | 166 |
| 3.4    | TERCEIRA ETAPA: OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ARTIFICIAIS DE CONDICIONAMENTO DE AR .....          | 167 |
| 3.4.1  | <b>Introdução</b> .....  | 167 |
| 3.4.2  | <b>Estratégias de otimização do sistema de ventilação natural automática</b> .....         | 167 |
| 3.4.3  | <b>Estratégias de otimização do sistema climatização artificial</b> .....                  | 170 |
| 3.4.4  | <b>Parâmetros para a simulação de recuperação de calor sensível e latente</b> .....        | 173 |
| 3.4.5  | <b>Análise de resultados da terceira etapa</b> .....                                       | 188 |
| 3.5    | QUARTA ETAPA: BALANÇO ENERGÉTICO .....   | 189 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.5.1 | Consumos adicionais de energia .....   | 189 |
| 3.5.2 | Descrição do sistema fotovoltaico simulado .....   | 190 |
| 3.5.3 | Análise de resultados da quarta etapa .....  | 191 |
| 4     | RESULTADOS .....   | 191 |
| 4.1   | PRIMEIRA ETAPA DA VENTILAÇÃO NATURAL<br>AUTOMÁTICA .....   | 192 |
| 4.1.1 | Primeira etapa da ventilação natural automática em<br>Belém.....   | 192 |
| 4.1.2 | Amplitudes e frequências de graus hora.....  | 196 |
| 4.1.3 | Primeira etapa da ventilação natural automática em<br>Curitiba.....  | 198 |
| 4.1.4 | Amplitude de graus hora de desconforto térmico e<br>transmitância térmica em Curitiba .....                                      | 202 |
| 4.2   | PRIMEIRA ETAPA DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL.....   | 211 |
| 4.2.1 | Primeira etapa da climatização artificial em Belém ....  | 211 |
| 4.2.2 | Primeira etapa da climatização artificial em Curitiba .  | 214 |
| 4.3   | SEGUNDA ETAPA DA VENTILAÇÃO NATURAL<br>AUTOMÁTICA .....  | 218 |
| 4.3.1 | Segunda etapa da ventilação natural automática em<br>Belém.....  | 218 |
| 4.3.2 | Segunda etapa da ventilação natural automática em<br>Curitiba.....   | 219 |
| 4.4   | SEGUNDA ETAPA DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL .....   | 219 |
| 4.4.1 | Segunda etapa da climatização artificial em Belém .....  | 219 |
| 4.4.2 | Segunda etapa da climatização artificial em Curitiba ..  | 219 |
| 4.5   | TERCEIRA ETAPA DA VENTILAÇÃO NATURAL<br>AUTOMÁTICA .....   | 220 |
| 4.5.1 | Terceira etapa da ventilação natural automática em<br>Belém.....   | 220 |
| 4.5.2 | Terceira etapa da ventilação natural automática em<br>Curitiba.....  | 221 |
| 4.6   | TERCEIRA ETAPA DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL.....   | 223 |
| 4.6.1 | Recuperação de calor sensível e latente em Belém .....   | 223 |
| 4.6.2 | Intervalo de controle adaptativo em Belém .....  | 227 |
| 4.6.3 | Recuperação de calor sensível e latente em Curitiba ...  | 228 |
| 4.6.4 | Intervalo de controle adaptativo em Curitiba.....  | 232 |
| 4.6.5 | Comparação consumos energéticos da recuperação de<br>calor sensível e latente e operação adaptativa em Belém<br>e Curitiba ..... | 233 |
| 4.7   | QUARTA ETAPA .....   | 234 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.7.1 | Geração fotovoltaica em Belém .....   | 235 |
| 4.7.2 | Comparação entre maior e menor balanço energético para a ventilação natural automática em Belém.....                                | 235 |
| 4.7.3 | Comparação entre maior e menor balanço energético da climatização artificial em Belém .....   | 236 |
| 4.7.4 | Comparação entre os maiores balanços energéticos em Belém .....   | 236 |
| 4.7.5 | Geração fotovoltaica em Curitiba .....  | 237 |
| 4.7.6 | Balanço energético para a ventilação natural automática em Curitiba .....   | 237 |
| 4.7.7 | Comparação entre maior e menor balanço energético da climatização artificial em Curitiba .....                                      | 238 |
| 4.7.8 | Comparação entre os maiores balanços energéticos em Curitiba .....  | 238 |
| 5     | <b>CONCLUSÕES</b> .....   | 240 |
| 5.1   | INTRODUÇÃO .....  | 240 |
| 5.2   | QUANTIFICAÇÃO E ANÁLISE DAS DIFERENÇAS MÁXIMAS NAS SOMAS DE GRAUS HORA DE DESCONFORTO TÉRMICO E CONSUMOS ENERGÉTICOS.....           | 240 |
| 5.2.1 | <b>Belém</b> .....  | 240 |
| 5.2.2 | <b>Curitiba</b> .....   | 241 |
| 5.3   | ANÁLISE DOS EFEITOS DAS OPÇÕES DE SOMBREAMENTO E DIFERENTES NÍVEIS DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA .....                                   | 242 |
| 5.3.1 | <b>Influência do sombreamento e transmitância térmica na ventilação natural automática em Belém .....</b>                           | 242 |
| 5.3.2 | <b>Influência do sombreamento e transmitância térmica na climatização artificial em Belém .....</b>                                 | 243 |
| 5.3.3 | <b>Influência do sombreamento e transmitância térmica na ventilação natural automática em Curitiba .....</b>                        | 244 |
| 5.3.4 | <b>Influência do sombreamento e transmitância térmica na climatização artificial em Curitiba .....</b>                              | 244 |
| 5.4   | INTERVALO DE CONTROLE ADAPTATIVO E RECUPERAÇÃO DE CALOR SENSÍVEL E LATENTE EM BELÉM E CURITIBA.....                                 | 245 |
| 5.5   | ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DAS DIFERENÇAS DE CONSUMO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO COM ALTO E BAIXO DESEMPENHO TÉRMICO ..... | 246 |
| 5.6   | LIMITAÇÕES .....  | 247 |
| 5.7   | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....  | 247 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 250 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>APÊNDICE A – Detalhamento do cálculo de transmitância térmica do envelope.....</b>   | <b>276</b> |
| <b>APÊNDICE B – Detalhamento do cálculo de transmitância térmica da esquadria .....</b> | <b>283</b> |
| <b>APÊNDICE C – Balanços energéticos mensais .....</b>                                  | <b>285</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TRANSIÇÃO DE MATRIZ ENERGÉTICA

A atual sociedade tecnológica depende dos combustíveis fósseis como fonte de energia, particularmente do petróleo. No entanto, o uso do petróleo tornou-se insustentável. Em primeiro lugar, o petróleo é um recurso não renovável, que atingiu os primeiros estágios do seu esgotamento (BARDI e al., 2013; CLOSSON, 2013; DALE e al., 2011; FANTAZZINI e al., 2011; HUGHES; RUDOLPH, 2011; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013; LEGGETT; BALL, 2012; McLEOD e al., 2012; SORMAN; GIAMPIETRO, 2013). Adicionalmente, os efeitos ambientais das emissões advindas do uso dos combustíveis fósseis tornaram-se insustentáveis, devido ao seu papel no aquecimento global (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2011). Dessa forma, é necessária uma mudança de matriz energética mundial.

A importância dos combustíveis fósseis transcende a produção de energia. Petróleo e gás natural são também essenciais como matéria prima para a produção industrial e agrícola. Em particular, a produtividade agrícola moderna, crucial para manter a atual população mundial alimentada, é ameaçada diretamente pelo esgotamento do petróleo e gás natural (BARDI e al., 2013).

## 1.2 ENERGIA E EDIFICAÇÕES

O setor das edificações consome 40% da energia primária no mundo, segundo International Energy Agency (2013), sendo o maior consumidor mundial de energia primária. Dessa forma, este setor é prioritário em qualquer política de transição de matriz energética. Medidas de eficiência energética aplicadas a edificações, podem reduzir significativamente o consumo energético das mesmas. O sucesso da implantação de normas de eficiência energética para edifícios com a R-2000 canadense ou a *Passivhaus* alemã, são prova do efeito de tais medidas.

Contudo, é possível transformar os edifícios de consumidores passivos em produtores ativos de energia, através da instalação de sistemas de geração renovável. Tal geração renovável pode suprir o consumo anual do edifício, e mesmo ultrapassá-lo, disponibilizando o excedente para a rede pública de energia. Tais edificações são designadas na literatura de Edifícios de Energia Zero (*Zero Energy Buildings* ou *Net Zero Energy Buildings*). Os edifícios de energia zero

permitem transformar as edificações, de parte do problema na transição de matriz energética, em parte importante da solução<sup>1</sup>.

O subsetor das edificações uni residenciais familiares deve ser prioridade na implementação de políticas de edifício de energia zero. Em primeiro lugar, por razões econômicas e sociais. O aumento do custo da energia decorrente da atual transição energética, ameaça a economia doméstica das famílias segundo Tanaka (2011). Edifícios residenciais unifamiliares de energia zero podem proteger as economias domésticas das famílias do aumento do custo da energia, através da geração própria para atender suas necessidades energéticas.

Em segundo lugar, por questões tecnológicas. Edifícios residenciais unifamiliares apresentam menores consumos energéticos, requerendo sistemas de geração de menor capacidade. Adicionalmente, verifica-se uma relação inversamente proporcional entre número de pisos e facilidade de atingir o balanço zero de acordo com Crawley (2011). A relação entre consumo energético e área de cobertura disponível para geração renovável, é mais favorável em edifícios residenciais unifamiliares. Estes edifícios congregam baixos consumos energéticos (comparativamente a outros subsetores do setor das edificações) e reduzido número de pisos, apresentando condições ótimas para atingir o balanço de energia zero.

No contexto brasileiro, os edifícios residenciais unifamiliares constituem mais de 80% dos domicílios (PROCEL, 2007) sendo, portanto alvo prioritário para a promoção de edifícios de energia zero no Brasil.

Genericamente, a literatura é unânime em definir edifício de energia zero como um edifício com um sistema de geração renovável próprio, com capacidade suficiente para repor o seu consumo energético líquido anual. No entanto, o detalhamento deste conceito tem sido objeto de uma continuada discussão. As distintas definições de edifício de energia zero divergem a ponto de um mesmo edifício

---

<sup>1</sup> É possível transformar subsetores inteiros do setor das edificações em produtores líquidos de energia. Segundo Griffith et al. (2006) medidas de eficiência energética e instalação de sistemas FV nos edifícios comerciais norte-americanos permitiriam transformar esse setor num produtor líquido de energia.

poder ser considerado de energia zero, ou não, dependendo da definição utilizada.

As diferentes definições de edifício de energia zero decorrem de diferentes entendimentos dos conceitos de energia consumida, de geração renovável de energia e geração própria de energia. Torcellini e al. (2006) coletaram quatro definições básicas de edifício de energia zero: energia local, energia primária, custo de energia e emissões. Posteriormente, mais definições foram propostas: inclusão de energia de transporte nas viagens dos usuários para o edifício (GOLDSTEIN e al., 2010), incluir o consumo energético de todo o ciclo de vida do edifício no balanço energético Hernandez; Kenny (2010) e até incluir a energia dispendida na produção de alimentos consumidos nos edifícios Pogharian (2008).

O número crescente de definições de edifício de energia zero levou alguns autores a simplesmente tentarem mapear as diferentes versões (MARSZAL e al., 2011; SARTORI e al., 2011). O debate comparando e defendendo os méritos de diferentes definições prossegue até a presente data (BERGGREN e al., 2013; HIMPE e al., 2013; McLEOD e al., 2012; MLECNIK, 2011; SRINIVASAN e al., 2012).

Torcellini e al. (2006) afirmam que qualquer edifício pode ser convertido num edifício de energia zero, bastando instalar um sistema de geração renovável de energia com capacidade suficiente. Contudo, esta estratégia não deve ser adotada, sendo mais econômico investir em medidas de eficiência energética para redução do consumo energético. Somente depois, se deve dimensionar um sistema de geração renovável, tendo este a menor capacidade possível. Este posicionamento encontra respaldo na literatura (MARSZAL e al., 2011; MLECNIK, 2011; SARTORI e al., 2011).

Independentemente da definição adotada, a eficiência energética apresenta uma importância basilar e crescente no processo de transição de matriz energética em todos os setores. Segundo a International Energy Agency (2013), o efeito atual das medidas de eficiência energética atua como uma nova fonte energética virtual, sendo essencial para garantir o acesso à energia de forma alargada.

Nesta busca de eficiência energética, a escolha da definição de edifício de energia zero impacta a capacidade de geração de negawatts (redução de consumo energético decorrente da aplicação de medidas de energia), devendo ter prioridade as definições que obrigam uma maior busca de eficiência energética.

### 1.3 SOLAR DECATHLON

Várias iniciativas visam promover a pesquisa e demonstração na área de edifícios de energia zero e, especificamente, em edifícios de energia zero residenciais unifamiliares. Uma dessas iniciativas é a competição internacional *Solar Decathlon*. Criada e gerenciada por o Departamento de Energia dos Estados Unidos, consiste em uma competição mundial entre universidades. O objetivo desta competição é projetar, construir e testar edifícios de energia zero, divulgando o conceito para o público em geral e buscando a viabilidade econômica em termos de mercado

A competição foi iniciada em 2002, nos Estados Unidos, tendo edições em 2005, 2007, 2009, 2011 e 2013 (SOLAR DECATHLON, 2013). Um acordo entre os governos espanhol e norte americano, criou uma versão europeia da competição: o *Solar Decathlon Europe*, com duas edições até ao momento: 2010 e 2012 (SOLAR DECATHLON EUROPE, 2013). Uma edição chinesa do evento ocorreu em 2013 (SOLAR DECATHLON CHINA, 2013). A participação nestes eventos incentiva a pesquisa científica e tecnológica na área, conduzindo à publicação de artigos sobre a temática dos edifícios de energia zero unifamiliares (DENG e al., 2011; EICKER; DALIBARD, 2011; HEDGES e al., 2008; RODRIGUEZ-UBINAS e al., 2012; WANG e al. 2009).

A competição consiste em dez provas que analisam o desempenho das equipes em diversas áreas, incluindo arquitetura, comunicação social, construtibilidade, design, economia, ergonomia, engenharia de automação, civil, elétrica, hidrossanitária, mecânica, produção, marketing e sustentabilidade. No ponto final da competição, as casas das várias equipes são montadas, lado a lado, no país anfitrião da competição (China, Espanha ou Estados Unidos). Nesta ocasião, existem períodos em que as casas são abertas à visita do público em geral, sendo as equipes concorrentes avaliadas pela exposição, ao público, dos conceitos da casa. Nos períodos restantes, o desempenho das casas é monitorado e sujeito a avaliações por diversas equipes de peritos, em provas objetivas e subjetivas. No entanto, este período somente culmina um processo de mais de dois anos em que o desenvolvimento dos projetos de cada equipe é avaliado em períodos trimestrais de acordo com parâmetros pré-estabelecidos.

Uma equipe formada por universidades brasileiras concorreu à edição de 2012 do *Solar Decathlon Europe* com o projeto Eko House

(2012). A Eko House apresenta uma proposta de edifício, construído dentro de uma lógica industrial, desmontável e facilmente transportável, construída de madeira e derivados.



Figura 1: Eko House durante a competição em Madri em 2012.  
Fonte ARCHDAILY (2012).

A Eko House incluiu projeto executivo detalhado, projeto para produção e o detalhamento do processo de montagem e desmontagem, aprovado pelos peritos da competição. A Eko House reduz o uso de material, através de um sistema construtivo de painéis de madeira protendidos por cabos de aço. Este sistema de construção leve permite adaptações a distintas condições climáticas, permitindo variar a composição dos painéis. A produção das peças de madeira foi feita através de sistemas de controle numérico computadorizado (*Computer Numerical Control*), para aumentar precisão dimensional e reduzir desperdício.

Dessa forma, a Eko House apresenta um paradigma de edifício deliberadamente diferente dos sistemas construtivos atualmente utilizados no Brasil, visando às condições encontradas em Madri. No entanto, o Solar Decathlon Europe visava o desenvolvimento de projetos e processos construtivos para futura aplicação na construção civil brasileira. A construção da Eko House decorreu de um projeto de pesquisa financiado por diversos patrocinadores, liderados pela ELETROBRÁS. O projeto visava a pesquisa de residências de energia zero adequadas à realidade brasileira, incluindo novos sistemas construtivos.

#### 1.4 QUESTÕES ESPECÍFICAS DE EDIFÍCIO DE ENERGIA ZERO NO BRASIL

A pesquisa em edifício de energia zero no Brasil ainda é escassa. Cervantes e Jannuzzi, (2002) abordaram o conceito de compensação de energia (*net metering*) e como o mesmo pode promover a autossuficiência energética. Pacheco e Lamberts (2008) apresentaram uma análise das políticas internacionais de promoção de edifício de energia zero. Lima e Jannuzzi, (2012) e Lima (2012) apresentam um estudo de caso do projeto de um edifício de energia zero de um centro de pesquisa, localizado em Campinas, dimensionando o sistema e apresentando uma análise econômica e de emissões. Montenegro (2013) avaliou o impacto econômico das mudanças, recentes e contraditórias, no enquadramento legal brasileiro da compensação de energia em residências unifamiliares. Pacheco e Lamberts (2013), analisaram a viabilidade tecnológica e econômica de edifícios residenciais unifamiliares de energia zero na capital estadual com pior geração fotovoltaica anual média (Florianópolis) e melhores condições econômicas (Belo Horizonte, com as tarifas residenciais mais elevadas).

A participação brasileira no Solar Decathlon resultou em produção científica na área de edifícios de energia zero abordando balanço energético, conforto térmico, eficiência energética e geração fotovoltaica (DÁVI, 2013; INVIDIATA e ORDENES, 2012, 2013; INVIDIATA, 2013).

A questão fundamental, em relação à literatura e modelos internacionais de edifícios de energia zero, versa na aplicabilidade direta destes no contexto brasileiro ou da necessidade de um modelo alternativo.

Em termos de geração renovável de energia, a localização majoritariamente tropical e equatorial favorece o Brasil, comparado com Estados Unidos da América e União Europeia. Isto é válido para a geração fotovoltaica na maioria do território nacional e geração eólica, em algumas regiões do país. No que tange à busca da eficiência energética, a análise da literatura mundial deve ser feita por uso final de energia e levando em conta a matriz energética e clima brasileiro. Os desempenhos de alguns usos finais de energia são independentes do clima, como a iluminação artificial e equipamentos elétricos. Nestes casos, não parece tão prioritária a pesquisa específica para a realidade brasileira.

No entanto, existem aspectos da realidade brasileira que diferem marcadamente do contexto internacional. Especificamente, as condições climáticas que tornam a refrigeração (e não o aquecimento) a necessidade primária de climatização na maioria da realidade brasileira, em contrapartida aos países de clima frio. Em segundo lugar, a singularidade de alguns usos finais de energia residenciais brasileiros comparados com a Europa e Norte América, como o chuveiro elétrico. Adicionalmente, o consumo energético residencial brasileiro é sensivelmente inferior ao dos países desenvolvidos. Finalmente, a matriz energética brasileira, com uma elevada parcela de geração por fontes renováveis, difere da realidade internacional. Dessa forma, a pesquisa em edifício de energia zero para o Brasil deve focar a refrigeração eficiente, e analisar as diferenças em usos finais de energia residencial.

#### **1.4.1 Dúvidas sobre a validade do modelo de climatização eficiente superisolado de climas frios no contexto brasileiro**

Para obter edifícios com baixo consumo energético, sistemas eficientes de climatização são necessários. Para condições de frio, existe um modelo de climatização eficiente que foi elaborado e refinado nas últimas décadas: o modelo superisolado (*superinsulated*) (ESBENSEN e KORSGAARD, 1977; FEIST e al., 2005; HOLLADAY, 2010; LEGER, 1988; SEIFERT, 2008; SHURCLIFF, 1986) que se consolidou em normas como a R-2000 e a *Passivhaus*.

O modelo superisolado prescreve uma conservação estrita do calor dentro do edifício. Propõe redução do consumo energético de climatização. Esta redução é feita através da otimização do isolamento térmico do envelope, baixa taxa de infiltração, com renovação de ar centralizada em um sistema mecânico de ventilação, com recuperação de calor, operando 24 horas por dia.

A eficiência do modelo superisolado em países frios foi demonstrada por avaliações pós-ocupação de edifícios *Passivhaus* (CEPHEUS, 2009; SCHNIEDERS; HERMELINK, 2006). O sucesso da norma *Passivhaus* na redução do consumo energético de climatização em climas frios desencadeou uma busca de aplicação deste modelo a outros climas (FEIST, 2006a, 2011; PASSIVE ON, 2007a; SCHNIEDERS, 2009). Especificamente, existem esforços para a adaptação e adoção da norma *Passivhaus* no contexto tropical e no território brasileiro (LAUSTSEN, 2011; PASSIPEDIA, 2013).

Para clima quente não existe uma norma comparável à *Passivhaus*, que incluía um sistema tão completo e comprovado em campo. O único método comprovado de garantir temperatura interna nos edifícios dentro da zona de conforto definida pela ISO 7730 é através do uso da climatização artificial, resultando em um elevado consumo energético.

A adoção de modelos concebidos para climas frios em contextos tropicais nem sempre é aconselhável. O isolamento térmico pode provocar o sobreaquecimento até em climas frios segundo Jelle e al. (2010). O potencial de sobre aquecimento de edifícios superisolados continua a ser um tema recorrente na literatura até no contexto europeu (BADESCU e al., 2010; McLEOD e al., 2013; MLAKAR; ŠTRANCAR, 2011; PASSIVE ON, 2007a; ROTAR; BADESCU, 2011; SCHNIEDERS, 2009). O potencial de sobreaquecimento decorrente de elevado isolamento térmico é exacerbado pelo aquecimento global (BEIZAEE e al., 2013; GUPTA; GREGG, 2013; NIK; KALAGASIDIS, 2013).

Adicionalmente, a norma *Passivhaus* requer a conjunção de elevado isolamento térmico, um edifício estanque, de janelas permanente fechadas, necessitando da colaboração dos usuários na manutenção destas condições para operação ótima. A literatura mostra resistências continuadas dos usuários, mesmo em climas frios, a este modo de operação ótimo exigido por sistemas de ventilação mecânica com recuperadores de calor (GILL e AL., 2010; PARK; KIM, 2012; VAN Der PLUIJM, 2012) e levanta dúvidas sobre a disponibilidade dos usuários aceitarem este paradigma em climas temperados (SANTOS; LEAL, 2012).

Os perigos da adoção de modelos de climas frios diretamente para climas quentes, podem ser ilustrados na avaliação de conforto térmico. Durante anos, verificou-se um viés na avaliação das velocidades do ar em ambientes internos como desconfortáveis, decorrente de um foco em climas frios (CÂNDIDO e al., 2010). Tal viés subestimou as condições de conforto em climas quentes e úmidos, ao assumir que as velocidades máximas do ar interno eram iguais aquelas verificadas para climas frios. Tal fato ignorou que maiores velocidades do ar auxiliam no conforto térmico em climas quentes, ao invés do que ocorre para climas frios.

Como filosofia de operação, o modelo superisolado, enclausura os seus ocupantes em um casulo térmico estático e estreito definido por a ISO 7730. Os usuários são isolados das condições climáticas externas. Contraposto ao modelo estático de conforto térmico,

existem alternativas como de modelos adaptativos como o presente na ASHRAE 55 (desde 2004) comprovado por experiências em campo (DEAR e al. 1997; DEAR; BRAGER, 1998). Os usuários, em interação com o meio externo, declaram conforto térmico em intervalos de temperatura mais amplos, dependendo da história térmica pregressa do meio exterior.

A permanência prolongada em ambientes com ar condicionado parece conduzir à perda da capacidade de adaptação, com conforto, a intervalos de temperatura mais amplos (BRAVO e GONZÁLEZ, 2013; CÂNDIDO e al., 2010). Tal atrofia térmica conduz a uma necessidade de constante permanência em ambientes climatizados, resultando no aumento em série de consumo energético.

Bravo e González (2013) relatam que em Maracaibo, cidade de clima equatorial, 76% do consumo energético residencial decorre do uso de ar condicionado. Nas regiões ultramarinas tropicais francesas, incluindo Guiana francesa, território fronteiro à região norte do Brasil, Garde e al. (2007) reportaram um valor de 50% de climatização, provocando um crescimento do consumo energético total das edificações de 4%. Uma preponderância elevada do consumo energético do ar condicionado ameaça a estabilidade da rede pública de energia, durante os períodos de maior calor no verão, segundo Strengers e Maller (2011). A promoção do ar condicionado como solução para o desconforto térmico, inibe a busca do desenvolvimento e adoção de estratégias passivas por parte do setor residencial segundo Strengers e Maller (2011). A busca de alternativas ao modelo energeticamente intensivo da climatização por ar condicionado é, portanto, desejável.

Além das dúvidas da adequação do modelo superisolado para climas quentes, no Brasil, é necessário, também, analisar a adequação deste modelo nas regiões brasileiras onde o desconforto por frio predomina. As temperaturas do ar, em tais regiões, seriam consideradas amenas em termos europeus, comparando-se às condições climáticas do Sul da Europa, mas com cargas radiantes mais intensas. Para tais regiões, o modelo *Passivhaus* ainda não tem especificações comprovadas em campo. Não está claro, portanto, que o modelo superisolado é necessário ou o mais adequado para as condições climáticas de frio brasileiras.

A instalação de ar condicionado sem alteração do envelope, na prática atual construtiva brasileira, ameaça provocar um aumento significativo do consumo energético. O modelo superisolado apresenta

uma alternativa a esse cenário. No entanto, existem alternativas à climatização com ar condicionado e ao modelo superisolado. Tais alternativas requerem menor consumo energético e exigência construtiva. Como exemplos temos a otimização do desempenho da ventilação natural automática, abrindo e fechando janelas automaticamente (SCHULZE e EICKER, 2013). Outros métodos incluem o uso de ventiladores de teto (LOMAS e GIRIDHARAN, 2012), a adoção de intervalos mais alargados para temperaturas de controle (*setpoints*) (MOLINA e al., 2013; NICOL e HUMPHREYS, 2010; SURLES e HENZE, 2012; WANG e al. 2013) ou sistemas pessoais de climatização (BUILDING & CONSTRUCTION AUTHORITY, 2013; De DEAR e al. 2013; PASUT e al., 2013 e ZHAI e al., 2013). É necessário, portanto, analisar o desempenho em consumo energético do paradigma superisolado no Brasil comparando-o com alternativas que combinem otimização da ventilação natural e uso do modelo adaptativo de conforto térmico.

#### **1.4.2 Definição primária de edifício de energia zero perante a matriz energética e usos finais brasileiros**

A literatura mostra um debate intenso sobre a definição de edifício de energia zero a adotar. Segundo Marszal e al. (2011), a definição (de energia) primária de edifício de energia zero é a mais adotada na literatura internacional. Sartori e al. (2011) afirmam que não existe uma definição única de edifício de energia zero, dependendo a definição de contexto e objetivos de energia política que o mesmo serve. É, portanto, a definição primária adequada ao contexto brasileiro? A composição da matriz energética brasileira difere marcadamente da realidade internacional. A matriz energética brasileira apresenta um dos percentuais mais elevados de geração renovável do mundo segundo a International Energy Agency (2013). Em 2012, 84,5% eletricidade foi gerada através de fontes renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013). A definição primária torna-se progressivamente irrelevante na medida em que a matriz energética se torna mais renovável. Numa matriz 100% renovável, a definição primária de edifício de energia zero perde seu sentido, uma vez que não é possível aplicar fatores de conversão. Dessa forma, a definição primária parece ter menor relevância na matriz brasileira.

Também se verificam diferenças nos usos finais de energia residenciais brasileiros comparados com os Estados Unidos da América e União Europeia, que facilitam a adoção da definição local. O consumo energético médio residencial brasileiro tem um valor

inferior a 200 kWh/mês (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013), menor que o verificado nos Estados Unidos da América (903 kWh/mês (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2012)) e União Europeia (472 kWh./mês, (BERTOLDI e al., 2012)). Dessa forma, é mais fácil atingir o balanço zero local com menor capacidade instalada, sendo mais fácil cumprir a definição local de edifício de energia zero. Ademais, o território brasileiro apresenta maior geração fotovoltaica média

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese é a análise de dois paradigmas distintos de climatização em edifícios residenciais unifamiliares de energia zero no contexto climático e energético brasileiro.

### 1.5.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

Quantificação e análise das diferenças máximas nas somas de graus hora de desconforto térmico e consumos energéticos anuais para o sistema de ventilação natural automática e climatização artificial em Belém e Curitiba;

Analisar os efeitos das opções de sombreamento e diferentes níveis de transmitância térmica nas somas anuais de graus hora e consumo energético com sistema de ventilação natural automática e climatização artificial para Belém e Curitiba;

Analisar as diferenças de consumo energético para o sistema artificial com intervalo adaptativo e recuperação de calor para a climatização artificial em Belém e Curitiba;

Estimar e comparar a diferenças de consumo energético de edifícios de energia zero com alto e baixo desempenho térmico.

## 1.6 ESTRUTURA DA TESE

A tese é dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema de residências unifamiliares de energia zero. O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura focando edifícios de energia zero, usos finais de energia e matriz energética brasileira, conforto térmico, e a evolução dos edifícios superisolados como uma resposta à redução de consumo energético de climatização em países de clima frio e modelos alternativos. O terceiro capítulo apresenta o método, que utiliza a simulação termoenergética de uma residência energia zero unifamiliar em Belém e Curitiba, segundo dois paradigmas distintos (ventilação natural automática e climatização artificial) para obtenção de conforto térmico. O quarto capítulo apresenta os resultados dos desempenhos da ventilação natural automática e climatização artificial. Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESCOPO ATUAL DA PESQUISA EM EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO

A literatura sobre edifícios de energia zero apresenta revisões de iniciativas, intenções e propostas para a promoção de edifício de energia zero (KOLOKOTSA e al. 2011; SCHIMMSCHAR e al., 2011; TODOROVIĆ, 2012), relatórios sobre estratégias e projeto de edifícios de energia zero (NEWELL e NEWELL 2010; DENG e al. 2011; LECKNER e ZMEUREANU, 2011; FONG e LEE, 2012; EUROPEAN COUNCIL FOR AN ENERGY EFFICIENT ECONOMY, 2011), propostas para comunidades de energia zero (MASON e al., 2013; PRAENE e al., 2012 e WHEELER; SEGAR, 2013), acompanhamentos pós ocupação de edifício de energia zero (FERRANTE e CASCELLA, 2011; FRANCO e al., 2011; GARDE e al., 2012; MILLER e BUYS, 2012; MLECNIK e al., 2012) e sobre a própria definição de edifício de energia zero (GOLDSTEIN e al., 2010; MLECNIK, 2011; HERNANDEZ e KENNY, 2010; MARSZAL e al., 2011; SARTORI e al., 2011; SRINIVASAN e al., 2012; MCLEOD e al., 2012; BERGGREN e al., 2013; MOHAMED e al., 2014).

### 2.2 POLÍTICAS NA ÁREA DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO

Os edifícios de energia zero são objeto de políticas para sua generalização nesta e na próxima década. A União Europeia definiu que todos os novos edifícios deverão ser de energia zero a partir de 2019 (EUROPEAN PARLIAMENT, 2009). Alguns países da União Europeia já definiram datas para a obrigatoriedade de edifícios de energia zero: Irlanda em 2013; Alemanha, França e Hungria em 2020 de acordo com o European Council for an Energy Efficient Economy (2011)<sup>2</sup>. O Reino Unido tem a meta de tornar todos os novos edifícios residenciais edifício de energia zero em 2016 (Department for Communities and Local Government, 2008). A Dinamarca antecipou a meta e, desde 2010, novos edifícios são de energia positiva (geram mais energia que consomem) de acordo com Laustsen (2011).

---

<sup>2</sup> Adicionalmente, a Finlândia e a Noruega definirão 2015 e 2017 como metas tornar obrigatória a norma *PassivHaus* que reduz o consumo de energia a níveis que permitem implementar EEZ. A Holanda está considerando tornar obrigatórios EEZ em 2020 de acordo com o European Council for an Energy Efficient Economy (2011).

Não obstante a atual liderança da União Europeia nesta área, as primeiras políticas de promoção dos edifícios de energia zero encontradas na literatura, surgiram da iniciativa do departamento de energia dos Estados Unidos em 2000<sup>3</sup> com o *US Zero Net Energy Buildings Outreach and Action Plan*. Nesse plano, novos edifícios residenciais deveriam ser de energia zero em 2025 e comerciais em 2030. Posteriormente, esse prazo foi antecipado para 2020, para edifícios residenciais, e 2025, para edifícios comerciais. Embora esses objetivos tenham sido reduzidos, ainda existem políticas federais norte americanas com metas obrigatórias para edifícios comerciais. O *Energy Independence and Security Act* de 2007, tem como meta com que novos edifícios comerciais sejam de energia zero a partir de 2030, 50% de todos os edifícios comerciais sejam edifícios de energia zero em 2040 e a totalidade dos edifícios comerciais em 2050 (CRAWLEY, 2009). A ordem executiva 13514 (*executive order*) estabeleceu que novos edifícios federais norte americanos precisarão ser edifícios de energia zero a partir de 2030 (CRAWLEY, 2010). Adicionalmente, o estado da Califórnia assumiu metas para a implementação de edifícios de energia zero (CALIFORNIA LEGISLATURE, 2009)<sup>4</sup>.

Não só atores governamentais buscam promover os edifícios de energia zero. A American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) tem como meta garantir, em 2020, a disponibilização das ferramentas que permitam ao setor da construção, como um todo, produzir edifícios de energia zero viáveis economicamente no mercado (ASHRAE, 2008).

### 2.3 DEFINIÇÕES PARA EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO

De uma forma genérica, um edifício de energia zero é aquele que produz, através de sistema de geração renovável próprio, energia suficiente para suprir o seu consumo anual. Esta definição, aparentemente simples, apresenta várias nuances. Estas nuances

---

<sup>3</sup> O documento não está mais disponível online, mas referências ao mesmo ainda são feitas em artigos mais antigos como Charron (2005).

<sup>4</sup> A legislação Californiana permite que os municípios proponham códigos energéticos mais exigentes. Essas propostas são revistas pelo estado da Califórnia e, caso aceites, viram lei dentro daquele município específico. Uma lista atualizada com os municípios nesta situação está disponível na California Energy Commission (2011).

impedem um acordo sobre uma definição universalmente aceite. As nuances decorrem de diferentes entendimentos sobre geração renovável de energia, geração própria de energia, consumo próprio de energia, medição da energia e qual o período do balanço energético a considerar.

A revisão mapeou dois artigos principais com o objetivo exclusivo de clarificar a definição de edifício de energia zero. Em primeiro lugar, o artigo de Torcellini e al. (2006). Em segundo lugar, o artigo de Marszal e al. (2011), resultado da força tarefa (*subtask*) conjunta da *European Building Performance Directive* (EBPD) e International Energy Agency (IEA). Esta força tarefa tem objetivo específico de revisar a literatura sobre as distintas definições de edifício de energia zero e visa propor no futuro uma definição de edifício de energia zero universalmente aceite. Outros quatro artigos apresentaram contribuições para as definições de edifício de energia zero: Hernandez e Kenny (2010), Goldstein e al. (2010), Pogharian (2008) e Sartori e al. (2011). Hernandez e Kenny (2010) propõem uma definição de edifício de energia zero que inclui todo o ciclo de vida do edifício de energia zero, contabilizando a energia de construção no balanço geral da energia. Goldstein e al. (2010) sugerem a possibilidade de adição, no balanço, da energia de transporte dos usuários nos deslocamentos para o edifício. Isto é, a energia consumida nos deslocamentos para o edifício e de volta do edifício (*commute energy*). Pogharian (2008) propõe incluir a energia consumida na produção dos alimentos e transporte dos mesmos até ao edifício<sup>5</sup>. A razão para tal proposta deriva da estreita dependência do atual modelo de produção agrícola do gás natural (para produção de fertilizantes) e do petróleo (para a produção de agrotóxicos). A crescente escassez futura dos combustíveis fósseis, portanto, impacta diretamente a produção de alimentos no futuro. Finalmente, Sartori e al. (2011) reconhecem que diferentes definições de edifício de energia zero são possíveis, dependendo dos objetivos de políticos de cada país e suas condições específicas.

---

<sup>5</sup> Paul Torcellini em uma entrevista menciona também a energia para produção dos alimentos consumidos pelos usuários dos edifícios como passível de contabilização no balanço (Schneider, 2009)

Segue-se uma revisão sobre cada um dos pontos em litígio na definição de edifício de energia zero.

### 2.3.1 Edifícios de Energia Zero e diferentes definições de energia

As diferentes definições de energia referem-se ao modo como a energia do balanço deve ser contabilizada. Torcellini e al. (2006) mapearam quatro definições diferentes de energia utilizadas em definições de edifício de energia zero. A saber:

- Energia local;
- Energia primária;
- Custo de energia;
- Emissões da energia.

As distintas definições podem implicar em diferenças profundas. Um mesmo edifício pode ser, ou não, considerado edifício de energia zero, simplesmente mudando a definição de energia utilizada. Duas definições de edifício de energia zero são as mais frequentes utilizadas na literatura: definição local e primária.

A definição de energia zero local mede a energia no medidor na saída do edifício. A energia a ser repostada (por geração própria) é igual à energia importada (durante o período de balanço). É a definição com maior facilidade para implementar segundo Torcellini e al. (2006). A razão está na fácil contabilização do balanço. Em contrapartida, é a definição que exige a maior geração de energia para atingir o balanço (MOHAMED e al., 2014). Consequentemente, força a aplicação de medidas mais estritas e exigentes de eficiência energética.

A definição primária é adotada na maioria das definições de edifício de energia zero, segundo Marszal e al. (2011) incluindo a última versão (*recast*) da *European Performance Building Directive* (EUROPEAN PARLIAMENT, 2010). A definição primária pode ser vista como oposta à definição local, fazendo distinções entre as diferentes fontes de energia. A definição primária leva em conta os custos energéticos embutidos na geração e transmissão de energia. A definição local é enxergada como ignorando a eficiência geral do sistema. Por essa razão, a definição local é preterida pela definição primária, pela maioria dos autores. Exemplificando, assumindo uma matriz energética em que 100% da eletricidade é produzida por turbinas movidas a gás natural. Nem toda a energia contida no gás natural é convertida em eletricidade, verificando-se perdas. Estas perdas ocorrem de duas formas. Na geração da energia, onde parte da

energia do gás natural se perde nas turbinas como calor, atrito e ruído. Posteriormente, perdas ocorrem na transmissão e distribuição da eletricidade, desde a central de geração até ao ponto de consumo. O quociente entre a energia utilizada na geração e a energia que efetivamente chega ao ponto de consumo, é designada por fator de conversão. Assumindo um fator de conversão de 3:1 para geração e transmissão para uma central de gás natural, tal significa que para três unidades de energia de gás natural consumidas para ativar a turbina, somente uma unidade de energia em eletricidade chega efetivamente ao consumidor final. As restantes duas unidades de energia são perdidas em na geração e transmissão.

Do ponto de vista contabilização de energia primária faz sentido a troca de combustíveis. Usos finais de energia que possam usar diretamente gás natural como fonte de energia devem fazê-lo. Ao realizar esta troca, designada na literatura de troca de fonte de energia (*fuel switching*), o edifício ganha um crédito de energia. Esse crédito resulta da poupança de energia decorrente de trocar um equipamento ou sistema operando a eletricidade para um operado a gás. Para cada equipamento operado a eletricidade, pelo fator de conversão, cada unidade de energia utilizada implicaria a perda de duas unidades adicionais na geração e transmissão. Por esta razão, a definição primária é eleita, pela maioria dos autores, como a definição mais adequada para medida do balanço energético.

Outra definição possível para a medição para contabilizar o balanço, é o custo da energia. O custo da energia varia conforme a fonte utilizada para gerá-la. De forma geral, o custo da energia renovável é maior que aquele da energia convencional, embora essa realidade esteja mudando. Por essa razão, a geração de energia renovável é incentivada por alguns governos. A compra da energia renovável gerada é feita por um preço subsidiado, com uma tarifa superior à de mercado. Na definição custo de energia, um edifício não precisa repor todo o seu consumo energia. Simplesmente, precisa cobrir o custo da energia importada da rede. Quanto maior o subsídio pago pela energia renovável, maior a distância entre a energia consumida e efetivamente exportada.

Esta definição tem a sua utilidade do ponto de vista estritamente comercial dos proprietários e de uma ótica de curto prazo. Comercial, pois não garante a reposição da energia importada da rede; simplesmente garante um custo zero para o consumo energético do edifício. De curto prazo, pois na medida em que a matriz

energética se torna mais renovável, a tarifa diferenciada reduz o seu valor. É, portanto, uma definição de caráter provisório e muito sujeita às variações das políticas governamentais.

Outra definição possível para energia zero são as emissões consequência da energia consumida. Um edifício com esta definição pode inclusive ter uma designação distinta: Edifício Carbono Zero, sendo esta denominação mais utilizada na União Europeia. Segundo esta definição, um edifício de emissões zero é aquele que produz tanta energia renovável de emissão zero quanto àquela que usa de fontes de energia com emissões. É preciso notar que emissões zero podem se referir a carbono equivalente ou incluir outras emissões. Esta definição tem a nuance de exigir que a energia reposta para compensar as importações de energia, além de renovável seja de energia emissões zero. Esta definição depende do que se entende por emissões zero. No entanto, afirmar que uma fonte de energia tem emissões zero só pode ser possível do ponto de vista da operação do sistema e não considerando emissões embutidas.

### **2.3.2 Edifícios de Energia Zero e geração própria de energia**

Outro problema apontado na bibliografia, que impede uma definição clara de edifício de energia zero, está na definição de geração própria. Torcellini e al. (2006) observam diferenças entre as distintas fontes renováveis de energia e sugerem uma hierarquia entre as mesmas, para aplicação em edifício de energia zero.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dessas distinções e as secções. Segue-se uma análise dessas diferenças e da forma como as mesmas definem uma hierarquia.

Tabela 1: Hierarquia das opções de fontes energia renovável para uso de edifício de energia zero.

| Número  | Opções de fornecimento de energia   | Exemplos  |
|---|---|---|
| 0   | Reduzir consumo energético através de tecnologias de baixo consumo de energia                 | Iluminação natural, sistemas de climatização (HVAC), equipamento e iluminação de alta eficiência, ventilação natural, arrefecimento evaporativo.                          |
| <b>OPÇÕES LOCAIS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA</b>   |   |   |
| 1   | Uso fontes renováveis de energia disponíveis dentro da implantação do edifício                | Sistema Fotovoltaico, Aquecimento solar de água, e sistema eólico localizados no edifício   |
| 2   | Uso fontes renováveis de energia disponíveis dentro do terreno                                | Sistema Fotovoltaico, Aquecimento solar de água, geração hidrelétrica de baixo impacto e sistema eólico localizados no terreno, mas fora do edifício.                     |
| <b>OPÇÕES EXTERNAS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA</b> |   |   |
| 3   | Uso de fontes renováveis de energia disponíveis fora do terreno para gerar energia no terreno | Biomassa, lenha, etanol ou biodiesel podem ser importados de fora do terreno ou subprodutos do terreno que podem ser processados in loco para gerar eletricidade e calor. |
| 4   | Compra de energia renovável fora do terreno   | Compra de energia gerada por sistemas eólicos, fotovoltaicos, créditos de carbono ou outras opções “verdes” para compra de energia.                                       |

Fonte: Torcellini e al. (2006).

Torcellini e al. (2006) observam que qualquer edifício pode se tornar um edifício de energia zero, por mais ineficiente. Basta dispor de um sistema renovável de geração com capacidade suficiente. Os autores opõem-se a esta atitude. Defendem a necessidade de partir de

um edifício extremamente eficiente, para depois dimensionar a capacidade do sistema renovável de geração. Desta forma, a eficiência energética é o grau zero da hierarquia de fontes de energia renovável, sendo o ponto de partida para qualquer edifício de energia zero. Este ponto de vista também é defendido por (LAUSTSEN, 2009; MARSZAL e al., 2011).

Em segundo lugar, Torcellini e al. (2006) apontam que existem nuances na definição no que consiste geração própria de energia. A energia pode ser gerada na implantação do edifício (sistema fotovoltaico na cobertura), na área perto do edifício (sistema fotovoltaico no estacionamento do edifício). Pode ser também gerada num parque eólico dentro da propriedade, mas distante do edifício. Ou pode ser comprada de um parque eólico de terceiros. Para reduzir perdas de transporte, a geração deve estar localizada, o mais perto possível, do ponto de consumo. Por esse motivo, sistemas que possam ser instalados dentro da área de implantação dos edifícios, têm preferência sobre sistemas que não permitem tal opção (como geração micro hidroelétrica). Em segundo argumento, para manter todo o sistema de geração dentro da implantação do edifício, é o uso do solo. A área de implantação do edifício já está alocada para uso do mesmo, enquanto outras áreas, mesmo que pertencentes à mesma propriedade, podem ser necessárias para outros usos no futuro<sup>6</sup>. Dessa forma, o abastecimento de energia de um edifício de energia zero, não deve depender de área externa à sua implantação para geração de energia. Por último, limitar o sistema de geração renovável à área de implantação do edifício, induz a busca de edifícios energeticamente eficientes, por restrição da área de geração disponível.

Na energia renovável existe uma diferença entre geração e captação da mesma. Sistemas fotovoltaicos e eólicos captam e geram energia no mesmo ponto. Um gerador de biodiesel ou etanol, no entanto, gera energia no ponto, mas depende de insumos captados noutra local. Uma vez que a prioridade deve ser reduzir custos de transporte, sistemas fotovoltaicos e eólicos são opções preferíveis a sistemas cuja captação é feita fora da área de implantação do edifício.

Por último, existe a possibilidade de comprar energia renovável de terceiros para fechar o balanço zero. Esta é a opção com a menor

---

<sup>6</sup> Por vezes compulsóriamente como no caso de uma expropriação. Nesse casos os proprietários do terreno não têm a opção de manter o sistema renovável operacional.

classificação na hierarquia, pois os custos de transporte são os maiores e a geração da energia só legalmente é local, através da compra da mesma. Efetivamente, um edifício que siga esta estratégia, está dependente de fontes de geração de energia renovável externas. Em termos econômicos, também é a opção mais arriscada, pois pode implicar um maior custo operacional, maior incerteza no custo da energia e dependência da disponibilidade de energia de terceiros para venda.

### 2.3.3 Consumo próprio de energia em Edifícios de Energia Zero

Outro ponto de divergência, entre as distintas definições de edifício de energia zero, centra-se na definição de consumo próprio. Um edifício apresenta uma variedade de usos finais de energia. Distintos autores têm entendimentos diferentes sobre quais devem ser considerados no balanço. Segundo Marszal e al. (2011), a maioria das definições de edifício de energia zero não lista especificamente quais os usos finais de energia a serem incluídos no balanço. A pergunta pode parecer trivial, mas a *Nullenergihuset* (Casa de Energia Zero), um edifício de energia zero residencial, construída em 1975 na Dinamarca, usa a denominação energia zero referindo-se somente ao consumo energético de climatização (ESBENSEN e KORSGAARD, 1977). Marszal e al. (2011) citam especificamente o artigo de Torcellini e al. (2006) afirmando que o mesmo não discrimina os usos finais de energia a incluir no balanço. No entanto, a Tabela 1, cuja autoria é de Torcellini e al. (2006), menciona especificamente vários usos finais a serem objeto de medidas de eficiência energética, dentro da linha 0 da tabela. Dentro desses usos, estão incluídos, além do consumo energético em climatização, o consumo de água quente doméstica, o consumo energético equipamentos como eletrodomésticos e todos aqueles decorrentes de equipamentos conectados nas tomadas (*plug process*) e de iluminação artificial. Esta definição não se resume a equipamentos elétricos: fornos e fogões a gás estão incluídos no balanço. O consumo energético destes equipamentos tem de ser repostos, por uma quantidade equivalente de energia gerada por o sistema renovável. Embora tal não esteja explicitamente descrito na maioria das definições, esta parece ser a definição mais corrente.

A Tabela 2 relaciona que usos finais de energia residencial os autores revistos incluem no balanço energético.

Tabela 2: Síntese dos usos finais propostos para serem incluídos no balanço energético.

| Uso final de energia                                 | Fonte  |
|--|--|
| Sistemas de climatização                             | Esbensen; Korsgaard (1977), Torcellini e al. (2006) Pogharian (2008) Goldstein e al. (2010) Newell & Newell (2010) |
| Aquecimento de água doméstica                        | Torcellini e al. (2006) Pogharian (2008) Goldstein e al. (2010) Newell & Newell (2010)                             |
| Iluminação artificial                                | Torcellini e al. (2006) Pogharian (2008) Goldstein e al. (2010) Newell & Newell (2010)                             |
| Equipamentos   | Torcellini e al. (2006) Pogharian (2008) Goldstein e al. (2010) Newell & Newell (2010)                             |
| Transporte de pessoas até e de volta do edifício     | Pogharian (2008) Goldstein e al. (2010) Newell & Newell (2010)   |
| Produção e transporte dos alimentos até ao edifício* | Pogharian (2008)   |

(\*exclui energia de preparação de alimentos na cozinha, incluída em na energia dos equipamentos Fonte: autor)

### 2.3.4 Edifícios de Energia Zero e Transporte

Alguns dos usos finais de energia propostos para serem contabilizados no balanço do edifício de energia zero, transcendem aqueles usualmente associados aos edifícios. Goldstein e al. (2010) mencionam energia necessária para transportar os usuários para o edifício (*commute energy*). Os autores argumentam que o consumo da energia de transporte pode ultrapassar a energia consumida no período de operação do edifício. Newell e Newell (2010) projetaram e construíram a Casa Equinócio (*Equinox House*) que prevê, além de gerar energia para todos os sistemas da edificação, a geração adicional de 2000 kWh anuais, para alimentar um carro elétrico. Esses 2000 kWh anuais são suficientes para garantir 12.875 km anuais de deslocamento de um carro. Edifícios de energia zero projetados para fornecer energia para automóveis existem, pelo menos, desde 2007 (CARLISLE e al. 2007).

Adicionalmente, a transição de matriz energética reforça a ligação entre setores da edificação e transporte. Lund e Kempton (2008) argumentam que o setor dos transportes usa, na sua quase totalidade, combustíveis fósseis. Como tal, necessita migrar para uma nova fonte de energia. Por outro lado, a maioria das fontes de energia de maior disponibilidade e menor custo, estão sujeitas a variações de geração. Uma transição de matriz energética, para ter sucesso, necessita de equilíbrio entre geração e demanda. Os edifícios então fornecem o elo que permitirá que eletricidade e o setor dos transportes se unam, através da tecnologia veículo para rede (*Vehicle-to-Grid* (V2G)). Tal integração pode ocorrer através de veículos elétricos ou veículos híbridos elétricos (*Plug in*). As vantagens tecnologia veículo para rede na rede pública de energia são variadas, incluindo gerenciamento do pico de carga e regulação de frequência (HARTMANN e ÖZDEMIR, 2011; WHITE e ZHANG, 2011). Adicionalmente, Kisacikoglu e al. (2010) salientam que a tecnologia veículo para rede também auxilia no gerenciamento da corrente reativa.

### 2.3.5 Edifícios de Energia Zero e alimentação

Outro uso final de energia, usualmente não incluído no balanço dos edifícios, é o custo energético da produção de alimentos. Pogharian (2008) propôs que o mesmo fosse agregado no balanço da casa, definindo o conceito de casa de energia de alimentação zero (*Net Zero Energy Food*). Um projeto de demonstração incorporando estes conceitos, a *Alstonvale Net Zero House*, foi construído em Hudson, Quebec, no Canadá (ATHIENITIS e al., 2009). Esta residência unifamiliar de energia zero incluía plantações de comida para reduzir a necessidade de importação de comida. A fundamentação conceitual para incluir a energia de produção da alimentação, é a mesma para a inclusão da energia de transporte. A extrema dependência do atual sistema agroindustrial dos combustíveis fósseis. Adicionalmente, verifica-se um déficit energético entre energia consumida para produzir os alimentos e a energia contida nos mesmos, segundo Horrigan e al. (2002).

### 2.3.6 Metodologias para definição de Edifícios de Energia Zero

O presente trabalho utiliza a metodologia de Marszal e al. (2011), como base da revisão da literatura de edifício de energia zero. Esta escolha adveio da sua abrangência na revisão da literatura e ter

surgido como resultado de um esforço conjunto tarefa 40 da *Internacional Energy Agency/European Building Performance Directive*. A tarefa 40 visa estabelecer uma definição, universalmente aceita, de edifício de energia zero. O referido artigo propõe uma metodologia de sete pontos para balizar o debate sobre busca de uma definição de edifício de energia zero. Os sete pontos são:

- Definição do balanço;
- Período do balanço;
- Tipos de consumos energéticos incluídos no balanço;
- Tipo de balanço energético;
- Opções de energia renovável;
- Interligação com a rede de energia;
- Requisitos para eficiência energética, clima interno e interação entre edifício e rede.

### **2.3.7 Definição para o balanço adotada**

O primeiro ponto da metodologia refere-se à definição de como medir a energia gerada e consumida. A bibliografia avança quatro definições: energia local, primária, custo de energia e emissões.

A escolha pela energia primária na maioria dos autores decorre da intenção de assegurar um uso mais racional da energia escassa, ao contabilizar custos de geração, transmissão e distribuição da mesma. Adicionalmente, permitiria comparar os méritos entre diferentes fontes de energia para cada uso quando usar gás natural ao invés de eletricidade.

### **2.3.8 Período do balanço**

Segundo Marszal e al. (2011) a literatura sobre o tema referencia três períodos para balanço: anual, sazonal e operativo sendo o primeiro referido o mais comum. O período de balanço determina quando se inicia e termina a contabilização das exportações e importações de energia. No termino deste período o balanço terá de ser igual ou superior a zero.

O período operacional visa incluir considerações sobre ciclo de vida dentro do balanço. A literatura enxerga o período operativo como a inclusão no balanço de energia das fases de construção e demolição do edifício de energia zero (HERNANDEZ e KENNY, 2010). Dessa forma, o edifício de energia zero teria que gerar energia adicional ao longo do seu período operativo. Essa energia adicional visa repor a energia já

consumida na construção do edifício de energia zero e saldar a energia a ser gasta no futuro com demolição do edifício de energia zero. Estes dois consumos seriam adicionados à energia necessária para suprir a operação do edifício (O consumo energético operacional pós-ocupação do edifício).

### **2.3.9 Tipos de consumos de energia incluídos no balanço**

Um edifício tem distintos usos finais de energia. Segundo Marszal e al. (2011) alguns autores defendem que alguns desses usos sejam excluídos fora do balanço energético; por exemplo, a energia despendida no aquecimento de água. A energia para cozinha de alimentos é outro exemplo, quando o gás é a fonte de energia para operação dos equipamentos. Não existe consenso sobre este ponto na literatura.

### **2.3.10 Tipo de balanço energético**

Segundo Marszal e al. (2011) a literatura apresenta duas formas distintas de balanço energético. Um é o balanço entre a energia renovável gerada e energia consumida. Outro, o balanço entre energia exportada e importada pela rede. No entanto, a diferença entre estes dois balanços só ocorre em casos muito específicos. Um exemplo seria um edifício utilizando combustível fóssil com um sistema de cogeração. Com sistemas renováveis de geração, os dois balanços se equivalem.

### **2.3.11 Opções de energia renovável**

Como proposto por Torcellini e al. (2006) e reforçado por Marszal e al. (2011) existe uma hierarquia de preferência entre diferentes formas de geração renovável de energia. Esta hierarquia tem vários graus que decorrem da distância entre geração e consumo energético. As fontes de energias que permitem uma menor distância entre geração e consumo, reduzem perdas de transporte. Permitem, igualmente, um uso do solo mais eficiente.

### **2.3.12 Interligação com a rede de energia**

Segundo Marszal e al. (2011), os edifícios de energia zero podem, ou não, ser ligados na rede pública elétrica. Torcellini e al. (2006) concordam com este ponto de vista. No entanto, defendem a preferência para edifício de energia zero ligados na rede, por

permitirem um uso mais eficiente da energia gerada e menor custo. Note-se que em termos práticos, um edifício zero ligado na rede é sensivelmente distinto de um edifício zero autônomo. Desligado da rede, o edifício, demanda maior capacidade de geração para atender os picos de demanda, necessita de um sistema de armazenamento de energia próprio e não pode exportar energia excedente.

### **2.3.13 Requisitos para eficiência energética**

Segundo Marszal e al. (2011), assim como Laustsen (2011), falta na literatura um posicionamento claro sobre a relação entre eficiência energética e edifício de energia zero. No entanto, Torcellini e al. (2006) frisam a importância conceitual da eficiência energética para os edifícios de energia zero, atribuindo-lhe uma importância basilar. Segundo Torcellini e al. (2006) existe uma premissa subjacente que embasa toda a hierarquia. Tal premissa consiste na aplicação de todas as medidas de eficiência energética possíveis, antes de dimensionar a capacidade do sistema gerador de energia. De contrário, qualquer edifício, por mais ineficiente que seja se pode tornar um edifício de energia zero. Basta estar conectado a um sistema de geração de capacidade suficiente. Torcellini e al. (2006) e Laustsen (2011) mencionam que tal procedimento não deve ser aceite. Medidas de eficiência energética são mais econômicas e sustentáveis. Somente após a aplicação destas medidas, se deve dimensionar o sistema de geração renovável de energia.

Não obstante esta indicação, Torcellini e al. (2006) não indicam ou sugerem metas específicas e concretas a atingir na redução de energia, possível motivo da crítica de Marszal e al. (2011).

### **2.3.14 Conforto térmico**

Marszal e al. (2011) também concorda com a necessidade de estabelecer regras para o conforto térmico, pois é possível reduzir o consumo energético significativamente simplesmente omitindo sistemas de climatização. Laustsen (2011) e Newell; Newell (2010) reforçam e amplificam esta linha de argumentação. Os autores afirmam que se todos os sistemas e equipamentos que consomem energia num edifício forem eliminados, este edifício torna-se um edifício de energia zero.

No entanto, tal opção não deve ser seguida uma vez que implica na redução da qualidade de vida dos ocupantes da edificação. A redução no consumo energético não deve ser obtida através da

redução ou abandono de funcionalidades. O mesmo motivo que leva à necessidade de garantir condições de conforto térmico.

### **2.3.15 Interação entre edifício e rede**

Finalmente, Marszal e al. (2011) apontam que a bibliografia é escassa no quesito da interação entre edifício e rede. Mais especificamente, nos requisitos que pautem uma relação entre qualidade da energia que o edifício de energia zero importa e exporta. Segundo alguns autores, devem ser diferenciados os edifícios de energia zero, dependendo do período que importam, ou exportam, energia da rede. Um edifício de energia zero que importa energia quando a rede necessita é diferente de outro que exporte energia nesse período. No entanto, a literatura é escassa neste ponto e diverge como definir especificamente a usabilidade da energia.

## **2.4 EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO COMO EVOLUÇÃO DOS EDIFÍCIOS DE BAIXA ENERGIA**

Os edifícios de energia zero residenciais unifamiliares não são um fenômeno novo. Charron e Athienitis (2006) citam especificamente a casa Carlisle, construída em 1980, na cidade de Carlisle, Massachusetts, nos Estados Unidos. A casa é uma residência unifamiliar, interligada à rede, com um sistema de geração fotovoltaica de 7,5kW e 14 m<sup>2</sup> de coletores solares.

A designação Energia Zero aplicada a edifícios remonta no mínimo a 1975 com a construção da *Nullenergihuset* (Casa de Energia Zero) pela universidade técnica da Dinamarca segundo Seifert (2008). Energia zero, neste caso, referia-se ao consumo zero de energia para climatização. Tal fato enfatiza a importância do consumo energético para climatização nos climas frios e mostra como os edifícios de energia zero decorrem e se apoiam numa evolução tecnológica anterior em edifícios alta eficiência energética, ou edifícios de baixa energia.

### **2.4.1 Breve introdução aos edifícios de baixa energia**

Parker (2009) realizou uma revisão sobre casas de baixa energia nos Estados Unidos, onde três fases podem ser notadas. Casas solares ativas nas décadas de 1950 e 1960, casas solares passivas nas décadas de 1960 e 1970 culminando nas casas superisoladas, a partir da segunda metade da década de 1970.

A adoção destas tecnologias foi lenta no início. Segundo Shurcliff (1986) em 1973 existiam somente cerca de trinta casas solares sendo que a maioria era do tipo ativo. No entanto, em 1986 os números já existiam mais de cinquenta mil casas solares do tipo solar passivo.

Segundo Parker (2009) o interesse na redução do consumo energético começou nos Estados Unidos antes do início da segunda guerra mundial. Nesse período, o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) pesquisou edifícios aquecidos por via solar. Este trabalho levou à construção de quatro estruturas de pesquisa, culminando com *Solar House IV*, construída entre 1958-1959. A estratégia seguida utilizava 60 m<sup>2</sup> de coletores solares ativos que supriam 57% das necessidades energéticas de aquecimento de calefação e aquecimento de água. Nessa época os esforços concentravam-se em criar casas solares ativas. Casas solares ativas tinham sistemas de aquecimento de ar e água que substituíam gás ou derivados do petróleo utilizando o sol como fonte de energia. A Figura 2 apresenta fotografias das quatro *solar houses*.



Figura 2: MIT Solar House I a IV. Fonte: Parker (2009).

Segundo Parker (2009), com a crise energética da década 1970, os sistemas ativos solares (caros e complexos) são abandonados em favor de sistemas solares passivos. Os edifícios solares passivos buscavam ganhos solares diretos através de fachadas envidraçadas, ganhos solares indiretos (como paredes de Trombe), de *sunspaces* (Estufas na fachada sul, fazendo um pulmão térmico (*buffer*)) e uso de massa térmica interna para manter conforto, reduzindo a capacidade dos sistemas ativos de climatização.

A Figura 3 apresenta um exemplo de casa solar passiva. Alguns desses edifícios apresentaram reduções de consumo energético em torno de 70%. No entanto, as casas solares passivas, com extensas fachadas envidraçadas, apresentavam problemas de sobreaquecimento e variações amplas de temperatura interna, devido a excessivos ganhos solares durante o dia e perdas durante a noite.

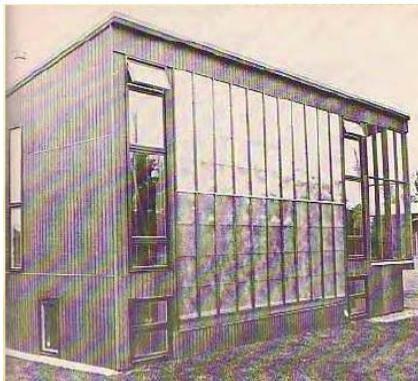


Figura 3: Exemplo de casa solar passiva. Fonte: Holladay (2010).

Em 1974, em pleno primeiro choque petrolífero, o Centro para Estudos de Energia e Ambiente da universidade de Princeton (*Center for Energy and Environmental Studies*) recebeu financiamento para estudar a perda de calor nos edifícios residenciais segundo Holladay (2010). Os pesquisadores neste centro iniciam o uso de câmeras infravermelhas associadas a insufladores (*blowerdoors*), para detecção de fugas térmicas no envelope (GROT e al., 1976).

Paralelamente, em 1975<sup>7</sup>, o Laboratório de Isolamento Térmico da Universidade Técnica da Dinamarca, construiu a *Nullenergihuset* (Casa de Energia Zero). Apresentava uma combinação de isolamento e estanqueidade elevados, com recuperação de calor do ar na saída. As paredes apresentavam uma transmitância térmica de  $0,14 \text{ W/m}^2$ , para as paredes, e de  $0,10 \text{ W/m}^2$ , para piso e cobertura. O sistema de recuperação de calor tinha uma eficiência de 90% para  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  e 83% para  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ . Esta casa possuía um sistema solar ativo com  $42 \text{ m}^2$

---

<sup>7</sup> Existe discrepância na literatura sobre a data de construção. Seifert (2008) afirma que a data de construção foi 1973. No entanto, o artigo dos autores do projeto da *Nullenergihuset* Esbensen; Korsgaard (1977) menciona 1975, sendo essa a data seguida.

para aquecimento de ar e um sistema de armazenamento de água isolado com 30 m<sup>3</sup> de capacidade segundo Esbensen e Korsgaard (1977). Embora tivesse o nome de energia zero, o edifício visava somente atingir o balanço zero em energia de climatização. Este fato mostra a ligação estreita entre edifícios de baixa energia, consumo em climatização e edifícios de energia zero em climas frios. A Figura 4 mostra uma foto da Casa de Energia Zero.



Figura 4: Foto da Nullenergihuset. Fonte: Holladay (2010).

Em 1976, segundo Parker (2009), uma equipe de simulação de desempenho energético em edificações desenvolveu um projeto chamado *Lo-Cal House*, baseados em simulações de desempenho de energia (Figura 5). A equipe era liderada pelo professor Wayne Schick, no Conselho de Casas Pequenas (*Small Homes Council*<sup>8</sup>) da universidade de Illinois em Urbana. O projeto foi pensado para o clima de Madison, Wisconsin e nunca foi construído, mas revelou-se inspirador para futuros projetos. O projeto desta casa apresentava níveis de isolamento térmico elevados para a prática da época (resistência térmica de 18,8 K m<sup>2</sup>/W, 5,4 K m<sup>2</sup>/W e 3,6 K m<sup>2</sup>/W para cobertura, paredes e piso, respectivamente). Apresentava também alto grau de estanqueidade, ganhos solares passivos com a maior área da zona envidraçada na fachada sul e ventilação providenciada por um recuperador de calor ar-ar.

---

<sup>8</sup> *Small Homes Council* também foi responsável pela invenção da climatização artificial de ar moderna.

A Figura 5 apresenta uma ilustração da *Lo-Cal House*.

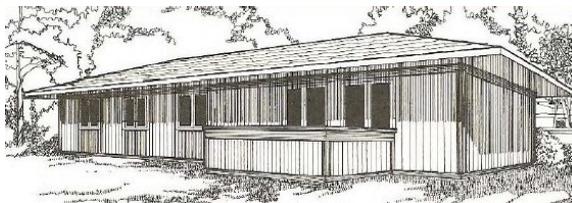


Figura 5: Figura da *Lo-Cal House*. Parker (2009)

O conjunto destas estratégias foi designado de casa superisolada, sendo creditada ao professor Wayne Schick a criação do termo (HOLLADAY, 2010). Este conjunto de estratégias forneceu o arcabouço teórico para a norma *Passivhaus* e R2000. No entanto, segundo Shurcliff (1986) trabalhando independentemente, no estado de Nova York, Richard Bentley, na cidade de Tupper Lake, e Bruce Brownell, na cidade de Edinburgh, construíram casas baseadas nos mesmos princípios em meados da década de 1970. Adicionalmente, no Alaska, Edward McGrath também construiu casas superisoladas. Em todos os casos, os construtores reportaram reduções no consumo energético com reduzidos custos incrementais.

No entanto, a aplicação das ideias da *Lo-Cal House* teve a sua maior exposição com um edifício demonstração construído no Canadá em 1977. Patrocinado pelo *National Research Council of Canada* a *Saskatchewan Conservation House* (ver Figura 6) foi a primeira casa a demonstrar publicamente a validade do superisolamento, no trabalho de Besant e al. (1979).



Figura 6: Saskatchewan Conservation House. Parker (2009)

Em 1979 a Leger *Superinsulated House* (ver Figura 7) foi construída em East Pepperell, Masschusetts e influenciou a construção de mais casas superisoladas nos Estados Unidos (PARKER, 2009; SHURCLIFF, 1986a).



Figura 7: Foto da Leger Superinsulated House. Parker (2009)

#### 2.4.2 A consagração dos edifícios superisolados: a norma *Passivhaus*

A norma *Passivhaus* é uma cocriação dos professores Dr. Bo Adamson (da Suécia) e Wolfgang Feist (da Alemanha) em maio de 1988. Ambos se propuseram a construir edifícios que não necessitassem de sistemas ativos de climatização. Os edifícios aqueceriam com o calor gerado por cargas internas, ganhos solares através de janelas e aquecimento do ar de entrada com recuperadores de calor.

Em 1995, Amory Lovins, o pioneiro norte americano da eficiência energética e fundador do *Rocky Mountains Institute*, visitou a casa protótipo de demonstração Kranichstein em Darmstadt. A visita de Amory Lovins, contribuiu substancialmente na transição do conceito de *Passivhaus*, de uma experiência científica numa realidade sólida de acordo com Feist (2006b). Especificamente, Amory Lovins falou da necessidade de redesenhar os detalhes de forma a reduzir custos adicionais (FEIST, 2006B). Dessa forma, a norma *Passivhaus* incorporou um dos princípios de design defendido por Amory Lovins: reduzir investimento através de projetos energeticamente eficientes. A redução de investimento decorre de aumentos elevados dos níveis de eficiência energética. Estes aumentos de eficiência energética provocam reduções no consumo energético. A reduções têm magnitude suficiente para permitir simplificar os sistemas de climatização, provocando uma redução de custos que compensa o custo das medidas de eficiência energéticas adicionais (FEIST, 2011). Como exemplo, no projeto CEPHEUS (*Cost Efficient Passive Houses as European Standards*), vários edifícios *Passivhaus* foram construídos na

Europa e monitorados. Um dos projetos, na Suécia, sem sistema de aquecimento de apoio, foi capaz de manter condições de conforto térmico durante o inverno. Dessa forma, teve o mesmo custo de construção que a prática do país, pois o custo extra das medidas de eficiência energética, foi compensado pela eliminação do sistema de aquecimento de apoio.

A norma *Passivhaus* começou como uma norma de desempenho com metas de energia e infiltração de ar. Segundo Feist e al. (2005):

- Consumo máximo de energia de aquecimento 15 kWh/m<sup>2</sup>/ano;
- Consumo máximo de energia primária 120 kWh/m<sup>2</sup>/ano;
- Infiltração de ar inferior 0,6 ach (renovações de ar por hora) em teste de pressurização com 50 Pa de pressão.

Embora a norma *Passivhaus* seja uma norma de desempenho energético, sem regras prescritivas, existe um conjunto de estratégias, empiricamente validadas, que seguidas resultam no cumprimento das metas de desempenho da *Passivhaus*. Muitas destas estratégias resultaram das pesquisas que embasaram os regulamentos obrigatórios de eficiência energética Dinamarqueses e Suecos da década de 1980 de acordo com Feist (2006b) e do trabalho pioneiro anterior nos Estados Unidos e Canadá sobre edifícios superisolados (HOLLADAY, 2010). Estas estratégias são:

- Alto grau de isolamento térmico;
- Redução de pontes térmicas;
- Estanqueidade (*airtightness*);
- Janelas isoladas;
- Recuperação de calor do ar.

Para o clima centro europeu, os parâmetros descritos na Tabela 3 devem ser utilizados segundo Feist e al. (2005). O conjunto destas estratégias com a implementação descrita na Tabela 3 resultou numa redução do consumo energético de 90% nos edifícios *Passivhaus* comparados com o exigido com os regulamentos térmicos alemães em 1990 segundo Feist (2006b).

Tabela 3: Especificações para *Passivhaus* no clima centro europeu.

| Componente  | Recomendado | Melhor prática                                  |
|---|-------------|---|
| Isolamento térmico de áreas opacas<br>$U$ ( $W/(m^2K)$ )  | <0,15       | 0,06  |
| Redução de pontes térmicas<br>(Transmissão térmica linear)<br>$\Psi_e$ ( $W/(m K)$ )                  | <0,01       | <0  |
| <b>Áreas transparentes</b>  |             |   |
| Transmitância térmica $U$ $W/m^2K$  | <0,8        | 0,51  |
| Fator Solar (%)   | >50         | 58  |
| Isolamento da esquadria $U$<br>( $W/(m^2K)$ )   | <0,8        | 0,75  |
| <b>Recuperação de calor</b>   |             |   |
| Eficiência líquida  | >75%        | 92%   |
| Perda de calor através da estrutura   | <5 W/K      |   |
| Demanda de eletricidade para<br>ventilação $W/(m^3/h)$  | <0,45       | 0,3   |
| <b>Redução de perdas em aquecimento<br/>(incluindo DHW)</b>   |             |   |
| Equipamentos de elétricos de alta<br>eficiência (Classe mais elevada de<br>eficiência da EU) Classe A | Classe A    | <60% da média da<br>Classe A                    |
| Limite recomendado para uso de<br>energia primária para consumo<br>doméstico de eletricidade          | <55         | 27 (assumindo<br>matriz energética<br>europeia) |

Fonte: Adaptado de Feist e al. (2005).

Uma vez que projeto passivo está intrinsecamente ligado ao contexto climático, quer as soluções construtivas, quer a própria definição centrada no clima central europeu necessita de adaptações para permitir a sua adaptação a outros climas.

Apoiada na pesquisa anterior em edifícios superisolados, a norma *Passivhaus* fundamenta o seu sucesso ao uso da capacidade térmica do ar conjugada com o aproveitamento das cargas internas e ganhos solares.

Feist (2006a) explicita o princípio básico de operação da *Passivhaus*. Em termos estritos de consumo energético, a estratégia que consome menos energia para climatização do ar, em edifícios, consiste em reutilizar o ar interno, sem introdução de ar do exterior. Isto é, manter a temperatura do ar interno em condições de conforto e não gastar energia para climatizar ar externo, fora das temperaturas de conforto.

No entanto, a não renovação do ar implica riscos cumulativos de saúde. Provoca acumulação de produtos tóxicos como compostos orgânicos voláteis presentes em tintas, vernizes, móveis e equipamentos no interior dos edifícios. Cria as condições para bactérias tóxicas (como a doença do legionário) e fungos. Finalmente, caso o edifício seja estanque o suficiente, pode levar à morte por asfixia por monóxido de carbono, caso um percentual significativo do oxigênio seja consumido.

Por questões de qualidade do ar interno, dentro de um edifício estanque, é necessário utilizar ventilação e introduzir ar de renovação do meio exterior. A norma *Passivhaus* surgiu do seguinte questionamento: é possível usar somente esta quantidade de ar de renovação para aquecer (e refrigerar) um edifício? Segundo Feist (2006a), tal é possível contando que a carga térmica a atender seja muito reduzida. Partindo da DIN 1946, 30 m<sup>3</sup>/h por pessoa é o valor mínimo aceitável para ventilação para garantir a qualidade interna do ar. Sabendo que o ar tem um calor específico de 0,33 Wh/(m<sup>3</sup>K) (a 21°C), e admitindo um aumento de temperatura do ar de renovação<sup>9</sup> de 30 K resulta que 300 W por pessoa poderiam ser transportados através do ar. A Equação 1 formaliza o raciocínio.

$$\frac{30 \text{ m}^3}{\text{hora/pessoa}} \times \frac{0,33 \text{ Wh}}{(\text{m}^3\text{K})} \times 30 \text{ K} = 300 \text{ W/Pessoa} \quad \text{Equação 1}$$

A equação 1 mostra que 300 W por pessoa podem ser transportados através do ar de renovação. Este valor não se refere somente ao calor decorrente da atividade metabólica do usuário. Inclui todas as fontes de calor dentro do edifício. Dessa forma, o calor liberado por a atividade metabólica do usuário, mais o calor liberado por equipamentos e iluminação utilizados por usuário até um valor de

---

<sup>9</sup> 30 K é o limite máximo de diferença entre a temperatura do ar de entrada e o aquecimento do mesmo para evitar pirolise do pó em suspensão no ar.

300 W, pode ser transportado somente através da taxa mínimo de renovação do ar interno.

Admitindo 30 m<sup>2</sup> de área condicionada por pessoa, resulta em 10 W de calor para cada metro quadrado de área condicionada. Este valor é independente de clima. Estes valores referem-se ao pico da carga, o valor máximo de aquecimento necessário.

É de notar que este valor de transporte varia com a diferença de temperatura entre o ar interno e externo. Quanto menor a diferença, menor quantidade de calor passível de ser transportada através da renovação de ar interno. As diferenças de temperatura entre exterior e interior no Brasil para condições de calor não atingem diferenças de 30 K. Mesmo admitindo uma temperatura de controle de 23 °C para refrigeração seria necessária uma temperatura do ar externo de 53 °C para que o ar de renovação se atinge o valor de 300 W por pessoa. Admitindo temperaturas máximas de 43 °C o valor de transporte do ar de renovação seria reduzido para 200 W por pessoa. Levando em conta modelos de conforto adaptativo poderiam assumir-se temperaturas de controle mais elevados e a diferença entre temperatura do ar interno e externo seria ainda mais reduzida. Assumindo uma temperatura de controle de 28 °C, a diferença de temperatura entre o ar interno e externo seria reduzida a 15 °C com a capacidade de transporte de calor sendo reduzida a 150 W metade do valor apresentado para o clima centro europeu. Adicionalmente, no contexto brasileiro, os ganhos de calor pelas cargas internas, não são benéficos para a refrigeração.

Para atingir valores tão reduzidos de carga térmica máxima, a *Passivhaus* tira proveito das cargas de calor internas (geradas por equipamentos, sistema de iluminação e calor gerados pelos usuários) e de ganhos passivos solares. O calor gerado por estas fontes, usualmente perdido, é aproveitado através das técnicas desenvolvidas nos edifícios superisolados. Esse aproveitamento depende do elevado grau de isolamento térmico, elevada estanqueidade e recuperação de calor do ar de renovação.

Dependendo do clima externo, as casas edifícios *Passivhaus* terão mais ou menos isolamento térmico (FEIST, 2006a). O nível adequado de isolamento térmico garante o aproveitamento balanceado das cargas internas. Caso os edifícios estejam insuficientemente isolados termicamente para as condições climáticas vigentes na sua implantação, ocorrerão temperaturas internas abaixo da zona de conforto (e igualmente carga térmica de aquecimento superior àquela que pode ser suprida com o transporte de calor

através do ar de renovação). Ao contrário, se o isolamento térmico for muito elevado para as condições climáticas vigentes na implantação do edifício, as temperaturas internas subirão acima da zona de conforto.

Deste princípio decorrem a estratégia propostas nas *Passivhaus* como forma de conseguir reduzir o pico de carga a  $10 \text{ W/m}^2$ . O superisolamento, estanqueidade dos edifícios e a recuperação de calor, têm por objetivo reduzir as perdas de calor, impedindo que a carga térmica nunca ultrapassar os  $10 \text{ W/m}^2$ .

### **2.4.3 A evolução da definição da norma *Passivhaus***

Desde a sua criação nos finais da década de 1980 até ao momento atual, a definição de *Passivhaus* sofreu diversas alterações. Essas alterações ocorreram no meio da década passada (entre 2006-2007) e são simultâneas às pesquisas sobre a adaptabilidade da norma *Passivhaus* a climas distintos aquele da Europa central, onde a norma origina. Especificamente, os estudos focados na adaptação da norma aos climas do sul da Europa obrigaram a algumas alterações.

A Tabela 4 sintetiza tal evolução. A definição inicial (número 1 da Tabela 4) decorre da pesquisa inicial no clima central europeu. Nesta formulação, a norma é definida como um conjunto de três condições de desempenho a serem cumpridas. Duas condições referem-se a energia e a restante terceira condição a estanqueidade do edifício. A ausência de uma meta para energia de refrigeração ilustra o contexto central europeu da definição número 1 original, onde não se verifica virtualmente necessidade de refrigeração.

Tabela 4: Evolução da definição da norma *Passivhaus*.

| Definição   | Número | Tipo       | Ano  |
|---|--------|------------|------|
| Demanda máxima de energia de aquecimento 15kWh/m <sup>2</sup> /ano  | 1      | Desempenho | 2005 |
| Demanda de energia primária 120 kWh/m <sup>2</sup> /ano   |        |            |      |
| Infiltração <0,6 ach  |        |            |      |
| Introdução de um limite explícito para demanda de energia de refrigeração no verão (15kWh/m <sup>2</sup> /ano)  | 2      | Desempenho | 2005 |
| Limite mínimo para conforto térmico no verão: temperaturas internas de verão não podem ultrapassar os limites propostos na PrEN 15251   |        |            | -    |
| Infiltração < 1,0 ach renovações de ar por hora   |        |            | 2007 |
| <i>Passivhaus</i> é aquele edifício que o conforto térmico (ISO 7730) é alcançado somente através do pós-aquecimento ou pós-refrigeração do ar exterior suficiente para manter as condições de qualidade interna do ar (DIN 1946) sem necessidade de ar recirculado | 3      | Funcional  | 2006 |

Fonte: 1: Feist e al. (2005), Schnieders e Hermelink (2006)1, 2 PASSIVE ON (2007b)2, 3 Feist (2006a)3

O sucesso da norma *Passivhaus* na redução do consumo energético, comprovada por estudos de pós-ocupação como o projeto CEPHEUS (CEPHEUS, 2009; ENERCITY, 2001; SCHNIEDERS; HERMELINK, 2006) levou ao interesse de aplicação da norma em locais

fora do contexto climático da Europa central. Especificamente, em locais com climas mais quentes como o sul da Europa.

Edifícios superisolados podem sobre aquecer até em climas frios segundo Jelle e al. (2010). O sul da Europa, com verões quentes e invernos mais amenos comparados com a Europa central aumenta estes riscos. Dois estudos enfocaram como adaptar a norma *Passivhaus* para as condições do sul da Europa. O programa europeu PASSIVE ON (2007b) e a tese de doutorado de Schnieders (2009).

O programa *Passive On*, patrocinado pela União Europeia, decorreu de 2005 a 2007 e apresenta propostas de adaptação na norma *Passivhaus* ao sul da Europa. Cinco países europeus foram objeto de estudo: Espanha, França, Inglaterra e Itália e Portugal. França e Inglaterra foram estudados como exemplo de países em processo de aquecimento, sofrendo os efeitos da mudança climática. O programa foi coordenado pelo grupo de pesquisa de eficiência em usos finais de energia da universidade politécnica de Milan e dividido em cinco subprojetos cada um dos países estudados. Subprojetos diferentes foram realizados por organizações distintas. A pesquisa de cada grupo foi feita através de simulação computacional de desempenho energético. No entanto, cada um dos organismos nacionais seguiu uma metodologia própria, tornando difícil a comparação entre os resultados.

A Tabela 5 sintetiza quais os arquivos climáticos e programas de simulação utilizados nas simulações. A coluna validação verifica se o programa de simulação é validado segundo os protocolos do Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Tabela 5: Resumo dos arquivos climáticos e programas de simulação utilizados no programa *Passive On*.

| País        | Cidades               | Formato do arquivo climático | Programa de simulação | Validação |
|-------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------|
| França      | Carpentras e Nice     | Não mencionado               | Não mencionado        | -         |
| Itália      | Milan, Roma e Palermo | Formato incerto              | Não mencionado        | -         |
| Portugal    | Lisboa                | Epw                          | EnergyPlus            | Sim       |
| Reino Unido | Birmingham            | Não mencionado               | New Generation TAS    | Sim       |
| Espanha     | Sevilha, Granada      | Não mencionado               | Não mencionado        | -         |

Fonte: Dados retirados de PASSIVE ON (2007b). Dados de validação de programas de simulação são pesquisa do autor.

A Tabela 6 sintetiza os parâmetros propostos no programa para os distintos países. A taxa de infiltração máxima aumentou, comparada com os valores 0,3 a 0,6 ach utilizados na Europa Central. Mostra também o aumento da transmitância térmicas permitidas nas superfícies opacas comparado com o valor máximo de 0,15 W/m<sup>2</sup>K utilizado para Europa central.

Tabela 6: Resumo dos parâmetros nacionais sugeridos no programa Passive On.

| Especificações | Transmitância térmica   |   | Infiltração  |
|----------------|---|---|--|
|                | País  | Elementos opacos [W/m <sup>2</sup> K]                       | (pressão de 50 Pa)<br>[ach]                              |
| França         | -   | 1,2 vidro duplo de baixa emissividade, sombreado com brises | 1,0  |
| Itália         | Milán: C, p e pi: 0,134<br>Roma: C,p: 0,40; pi: 1,00<br>Palermo: C: 0,42; p: 0,54; pi: 1,34 | 1,4 Vidro duplo de baixa emissividade sombreado             | 1,0 (taxas maiores seriam possíveis para Palermo e Roma) |
| Portugal       | C:0,23; p: 0,32   | 2,9 Vidro duplo de baixa emissividade, com beirais e brises | 1,0  |
| Inglaterra     | C: 0,2; p: 0,15   | Vidro duplo de baixa emissividade                           | 3,0  |
| Espanha        | Granada: C: 0,26; p: 0,28; pi: 0,5<br>Sevilha: C: 0,39; p: 0,36; pi: 0,5                    | Área envidraçada a sul com sombreamento móvel               | 1,0  |

\*c: cobertura, p: parede, pi: piso. Fonte: autor. Dados retirados de PASSIVE ON (2007b)

As propostas para a transmitância térmica (valor U) para Inglaterra e Portugal não apresentam um valor máximo para a transmitância do piso. O solo tem uma temperatura menor, no verão, que a temperatura média do ar, servindo como um meio suplementar para perda de calor. No caso italiano, embora valores de isolamento do piso sejam propostos, os valores máximos de transmitância para piso aumentam conforme o clima se torna mais quente. Esta tendência é congruente com o uso do solo como meio adicional para perda de calor.

No entanto, existem incongruências neste quesito. A proposta inglesa não estipula valor máximo de transmitância para o piso, enquanto a proposta espanhola apresenta um valor máximo de 0,5 W/m<sup>2</sup>K. Sevilha apresenta um clima bastante mais quente que o clima inglês. Segundo Schnieders (2009), Sevilha é a cidade detentora do recorde de maior temperatura externa do ar já registrada na Europa (50 C°). Por essa razão a proposição de isolamento do piso com valor duas vezes superior ao de Roma e quase três vezes superior à de Palermo parece incongruente com um clima mais quente de Sevilha. Adicionalmente, em Sevilha, diferentemente das demais cidades do programa *Passive On*, a transmitância da cobertura é menor que a transmitância das paredes. A razão para tal fato não é mencionada nos relatórios do programa. O valor de transmitância da cobertura de Sevilha (0,39 W/m<sup>2</sup>K) é também bastante superior ao de Lisboa (0,23 W/m<sup>2</sup>K) e de Granada (0,26 W/m<sup>2</sup>K). Estes fatos não são mencionados nos relatórios e como tal estão ausentes as justificativas dos mesmos. No entanto, parece que estas estratégias para Sevilha (isolamento do piso e maiores transmitâncias na cobertura) não aparecem adequadas a um desempenho para clima quente.

No que tange às características térmicas das superfícies transparentes, a maioria dos estudos propõe o uso de vidros duplos. As transmitâncias térmicas variam entre 1,4 a 2,9 W/m<sup>2</sup>K, superiores à prática usual da Europa central com valor máximo de 0,8 e melhor prática de 0,51 W/m<sup>2</sup>K. Tal corresponde ao uso de vidros duplos ao invés de vidros triplos ou quádruplos como é usual na Europa Central. Esta diferença, mais uma vez, se deve as condições climáticas mais amenas das cidades estudadas no programa *Passive On*, comparadas com o clima da Europa central. Congruentemente, a cidade com o clima mais ameno, Lisboa, apresenta os valores máximos mais elevados para a transmitância das superfícies transparentes. A utilização de vidros de baixa emissividade (*Low-e*) é proposto em todas

as cidades, menos Lisboa possivelmente devido ao seu clima mais ameno.

Os documentos do programa *Passive On* são omissos quanto ao objetivo do uso dos vidros de baixa emissividade. Dado que o desconforto térmico por frio ocorre com frequência, mesmo nas cidades estudadas no programa *Passive On*, assume-se que o uso do mesmo está focalizado para melhorar o desempenho de aquecimento as edificações. O uso dos vidros de baixa emissividade nas *Passivhaus* na Europa central, tem um objetivo duplo. Por um lado, garantir as condições de isolamento térmico possibilitem cumprir os requisitos de consumo energético da norma *Passivhaus*. No entanto, segundo Feist (2006b), frequentemente vidros duplos seriam suficientes para atingir esse objetivo. O uso de vidros triplos e quádruplos de baixa emissividade sucessivas, objetiva eliminar a sensação de desconforto térmico localizado por frio, perto das superfícies transparentes, provocado por perdas de calor radiante para o exterior. No entanto, nos climas quentes, o fenômeno oposto ocorre; o desconforto térmico localizado por calor radiante perto de superfícies transparentes. Dessa forma, é razoável estudar como películas de baixa emissividade podem eliminar o desconforto térmico radiante perto de superfícies transparentes. Essa discussão, no entanto, não é abordada no programa *Passive On*.

Os limites máximos de infiltração propostos no programa *Passive On*, também são superiores aos propostos para a Europa central. O limite máximo de 0,6 ach da Europa central (FEIST e al., 2005) é aumentado para 1,0 ach para a maioria dos casos e ultrapassado na proposta para inglesa.

A Tabela 7 apresenta um cruzamento entre as estratégias bioclimáticas e resultados previstos em conforto térmico e consumo energético e a aplicação das mesmas em cada cidade simulada no programa *Passive On*. Quatro estratégias são revistas: ventilação noturna, recuperação de calor, ventilação natural e inércia térmica. A ventilação noturna é recomendada para todas as cidades exceto no caso da Inglaterra. Tal fato é congruente com as condições climáticas mais frias da Inglaterra, mais próximas da Europa central, que não utiliza ventilação noturna.

Tabela 7: Estratégias bioclimáticas propostas no programa *Passive On*.

| País       | Ventilação noturna | Recuperação de calor                               | Ventilação natural | Inércia térmica | Conforto térmico | Consumo de energia primária previsto  |
|------------|--------------------|--|--------------------|-----------------|------------------|---|
| França     | Sim                | Carpentras:<br>Sim, opcional,<br>80% de eficiência | Sim,<br>controlada | Sim             | EN 15251         | Capentras: *A:<br>8,8; R:0<br>Nice A: 10,2;<br>R: 4,4                           |
|            |                    | Nice:<br>Desumidificação<br>necessária             |                    |                 |                  |   |
| Itália     | Sim                | Sim<br>85% eficiência                              | Sim                | Sim             | EN 15251         | Milan: A: 10,4; R:<br>2<br>Roma: A 3,5; R:<br>2,4<br>Palermo: A:<br>1,2; R: 4,0 |
|            |                    |  |                    |                 |                  |   |
| Portugal   | Sim                | Não  | Sim,<br>controlada | Sim             | ASHRAE 55        | Lisboa A. 5,9<br>R. 3,7   |
| Inglaterra | Não                | Sim  | Sim,<br>controlada | Sim             | ASHRAE 55        | Nottingham<br>A. 13,8   |
| Espanha    | Sim                | Sim  | Sim                | Sim             | ISO 7730**       | Granada: A: 8,7;<br>R: 7,9<br>Sevilha: A:<br>21,7; R: 2,8                       |

\*A: energia de aquecimento, R: energia de refrigeração\*\*Indicado cumpre *Passivhaus*, assume-se uso de ISO 7730

Fonte: autor. Dados retirados de PASSIVE ON (2007b).

A recuperação de calor é aconselhada na quase totalidade dos casos, exceto em Lisboa, o clima mais ameno. Para a cidade de Carpentras (cidade de altitude nos Alpes mediterrâneos franceses) a recuperação de calor é sugerida como estratégia. Embora seja afirmado que o seu uso é facultativo. A recuperação de calor é indicada como obrigatória para todas as outras cidades.

Dessa forma, para cidades mais quentes que Lisboa, como Sevilha, Granada e Palermo é prescrita a recuperação de calor assim como as mais frias com Milan. Não são apontados os números que mostrem a eficiência da recuperação de calor separada por verão e inverno. Tal separação permitiria ter uma noção mais clara da utilidade da recuperação de calor durante o verão.

A ventilação natural é sugerida em todos os casos. No entanto, alguns casos utilizam ventilação natural automática enquanto outros não. Não fica claro o porquê da diferença. Em tese, a ventilação natural automática deveria obter os melhores resultados em conforto térmico.

Todos os casos sugerem o uso da inércia térmica como estratégia válida na redução do consumo energético. À priori, tal resultado parece coerente, especialmente em climas de verões quentes e secos onde a amplitude térmica diária é maior, como Lisboa, Sevilha e Granada. No entanto, convém salientar que a aplicação com sucesso de estratégias de inércia térmica depende da estabilidade do clima e da operação correta por parte dos usuários.

No programa, todos os edifícios, em todos os casos, atingiram os níveis mínimos de conforto, A maioria utilizou modelos adaptativos de conforto. No entanto, modelos diferentes foram utilizados: dois casos utilizaram a ASHRAE 55 e os restantes três a EN 15251. O modelo de conforto térmico utilizado nos casos espanhóis, não é explicitamente indicado. É afirmado que cumpre os requisitos de conforto da norma *Passivhaus*. Dessa forma, o modelo utilizado foi possivelmente a ISO 7730, um modelo estático de conforto térmico.

#### **2.4.4 A diferença conceitual entre frio e calor na climatização de edificações.**

O calor flui do potencial maior para o menor. Desta forma, para todo o edifício climatizado num clima frio o calor fluirá do interior (quente) para o exterior (frio). De acordo com o atual conhecimento físico, tal fluxo não pode ser detido. Embora não possa ser detido, pode ser controlado. A utilização de materiais de baixa transmitância

térmica reduz a transferência de calor. Com projeto e construção rigorosa, as pontes térmicas podem ser reduzidas, ao ponto em que as cargas internas do calor de ocupantes, iluminação e equipamentos, são suficientes para manter o interior do edifício dentro das condições de conforto térmico.

No entanto, existe um corolário que facilmente pode ser esquecido nesta estratégia. O meio externo mais frio é uma condição necessária para que tal estratégia funcione. Não é uma opção e sim uma premissa fundamental, decorrente das leis que regem a transferência de calor. Se a temperatura externa for superior à temperatura interna (o caso mais comum nos climas quentes onde a necessidade de refrigeração é superior à necessidade de aquecimento) então o calor gerado pelas cargas internas não fluirá mais para o exterior. Ao invés, o mesmo acumulará no interior do edifício resultando num aumento da temperatura interna. Adicionalmente, o calor do meio externo também flui em direção do interior do edifício sempre que a temperatura interna seja menor que a exterior. Dessa forma, num clima quente, é mais complexo utilizar sistemas passivos de condicionamento quando comparado como climas frios.

A evolução da norma *Passivhaus* demonstra a necessidade de adaptação do conceito para climas mais quentes. Esta revisão demonstrou como a gênese das estratégias tecnológicas da norma *Passivhaus* pode ser traçada às condições climáticas canadenses subárticas. Tais condições climáticas são bastante distintas das condições encontradas no Brasil.

## 2.5 EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO; BAIXA ENERGIA E A RECUPERAÇÃO DE CALOR

### 2.5.1 Introdução aos recuperadores de calor sensível

A recuperação de calor sensível (*Heat recovery ventilation* (HRV) ou *mechanical heat recovery ventilation*: (MHRV)) visa reaproveitar calor contido no ar exausto do edifício para garantir a renovação do ar interno. A renovação do ar é necessária por questões de salubridade do ar interno, para evitar o acúmulo de poluentes internos em concentrações tóxicas. A introdução contínua de ar externo permite a diluição dos poluentes internos exaustos em uma parcela do ar interior, substituída por ar externo. Embora, a renovação do ar interno seja um imperativo para a saúde humana, afeta a climatização do ar interno. O ar externo introduzido no edifício tem

frequentemente uma temperatura distinta da temperatura interna. O processo de recuperação de calor sensível permite reaproveitar o calor no ar interno exausto para condicionar o ar externo introduzido no edifício, reduzindo o consumo extra de energia.

A Figura 8 apresenta um esquema de operação de um sistema de recuperação de calor de ventilação.

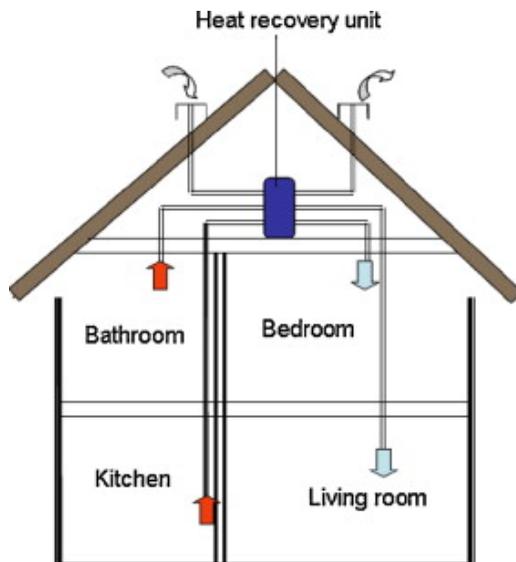


Figura 8: Esquema de sistema de recuperação de calor de ventilação.

Fonte: Mardiana-Idayu e Riffat (2012).

Nos trocadores de calor ar-ar, os fluxos de ar que entram e saem do edifício se cruzam, em percursos separados, mas contíguos. As partições que separam os dois fluxos são constituídas de materiais de alta transmitância térmica, para facilitar a transferência de calor.

A Figura 9 apresenta uma ilustração do princípio de operação de um trocador de calor.

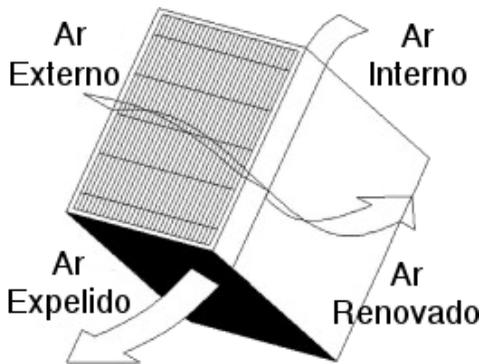


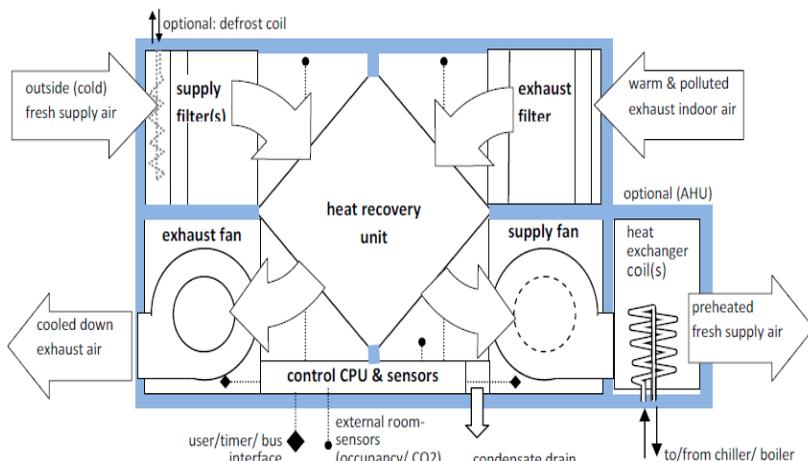
Figura 9: Ilustração esquemática do trocador de calor de contra fluxo.  
Adaptado de Min e Su (2010).

Dessa forma, ocorre a troca de calor entre o ar que sai do edifício com o ar que entra. Este processo preserva a maior parte do calor contido no ar de saída, transferido para o ar de entrada. Este fato reduz a perda de calor do interior do edifício, reduzindo assim a necessidade de reposição de calor e, conseqüentemente, o consumo energético em aquecimento.

Os sistemas de recuperação de calor são sistemas de ventilação balanceados. Em sistemas não balanceados a exaustão do ar do interno é feita através de ventilador enquanto a introdução do ar externo depende da ventilação natural por janelas e portas e infiltração. Sistemas de ventilação balanceados apresentam ventiladores distintos para a introdução do ar externo e exaustão do ar interno de acordo com Ecodesign Preparatory Study ENTR Lot 6 (2012).

A Figura 10 ilustra a operação de um sistema balanceado.

Figura 10: Ilustração de sistema de recuperação de calor balanceado operando para recuperação de calor no inverno.



Fonte: Ecodesign Preparatory Study ENTR Lot 6 (2012)

Segundo El Fouih e al. (2012) existem três tipos de sistemas de recuperação de calor: trocadores de calor ar-ar, regeneradores (permitindo a acumulação de calor) e trocadores de calor com um meio intermediário de transferência de calor. Esta revisão enfoca unicamente os trocadores de calor ar-ar por ser o sistema utilizado correntemente para recuperação de calor sensível em edifícios.

O mesmo processo pode ser utilizado para refrigeração. Um edifício refrigerado utiliza um recuperador de calor de ventilação, para refrigerar o ar que entra no edifício com o ar que sai do edifício.

Em climas quentes e úmidos, os recuperadores de calor de ventilação podem ser trocados por recuperação de calor sensível e latente (*Energy recovery ventilators, ERV*). A recuperação de calor sensível e latente distinguem-se por trocar umidade além do calor. Neste caso, o calor e umidade do ar que entra no edifício é trocado com o ar que sai do edifício. Reduzir a umidade no ar de entrada reduz o calor armazenado no vapor de água. Tal redução reduz a carga térmica latente, resultando na redução do consumo energético em climatização.

O termo recuperação de calor usualmente refere-se a sistemas tradicionais de ar condicionado conjugados com sistema de

recuperação de calor (CHEN e al., 2012; DELFANI e al., 2012; JWO e al., 2013; LIU e al., 2010).

### 2.5.2 Recuperadores de calor sensível e latente e qualidade do ar interno

O uso de recuperadores de calor sensível e latente apresenta vantagens na manutenção da qualidade do ar interno. Sistemas de climatização artificial de ar, refrigeram constantemente o mesmo ar, sem renovação com ar externo. Esta estratégia garante baixos consumos energéticos, mas implica em uma qualidade insalubre do ar interno, por acumulação de poluentes endógenos do edifício. Baixas taxas de renovação do ar provocam concentrações de distintos tipos de poluentes. A Tabela 8 compila os poluentes mais comuns do ar interno relacionados com suas fontes.

Tabela 8: Poluentes mais comuns do ar interno e suas fontes.

| Poluente  | Fonte  |
|---|--|
| Excesso de umidade e fungos   | Espaços debaixo dos pavimentos com terra exposta, pessoas, roupas secando dentro dos edifícios, cozinhar e lavar, plantas, lenha armazenada dentro dos edifícios |
| Ureia e formaldeído   | Alguns tipos de placas de compensado, paredes leves, carpetes, mobília, têxteis  |
| Radônio   | Solo e lençol freático   |
| Fumo de tabaco  | Fumar  |
| Químicos utilizados nas residências   | Produtos de limpeza, alguns produtos para passatempos, tintas e solventes, aerossóis   |
| Odores, viroses e bactérias   | Pessoas e animais de estimação   |
| Subprodutos da combustão (incluindo monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e particulados) | Equipamentos com queima de combustível incluindo fornalhas, aquecedores, secadores de roupa a gás, lareiras e fornos a lenha                                     |

Fonte: NATURAL RESOURCES CANADA (2012).

A redução da qualidade do ar interno pode induzir diversos problemas de saúde segundo a Natural Resources Canada (2012). A qualidade do ar interno é reduzida com o aumento da estanqueidade nos edifícios. Quanto mais estanques os edifícios, menor a renovação do ar interno por infiltração de ar do exterior. Por outro lado, a

renovação do ar interno através do recurso da ventilação mecânica implica no aumento do consumo energético de climatização. O recurso a recuperadores de calor de ventilação permite garantir taxas adequadas de renovação do ar interno, preservando a sua temperatura. Segundo Dimitroulopoulou (2012), a taxa mínima de renovação do ar é de 0,5 ach (0,5 trocas de ar por hora) nos países nórdicos e 0,6 ach no resto da Europa. O valor de 0,6 ach é o valor utilizado na norma *Passivhaus*, de acordo da norma alemã.

A recuperação de calor sensível e latente permitem, além de transferir calor entre o ar de entrada e de saída, transferir umidade. A transferência de umidade entre o ar de entrada e saída do edifício permite regularizar a umidade interna com benefícios de qualidade do ar interno e condições de conforto.

Em climas quentes e úmidos, a recuperação de calor sensível e latente permite transferir a umidade do ar de entrada no edifício para o ar de saída, reduzindo o excesso de umidade e a proliferação de fungos. Adicionalmente, resulta na redução da umidade relativa que aumenta o conforto térmico dos usuários.

Os recuperação de calor sensível e latente podem igualmente ser utilizados em climas frios nos períodos de inverno, quando a umidade relativa atinge valores inferiores ao limite mínimo de salubridade, devido à baixa temperatura do ar. Neste caso, a umidade do ar de saída do edifício é transferida para o ar de entrada no edifício mais seco, mantendo a umidade interna em condições salubres, evitando eletricidade estática, ressecamento das vias respiratórias e outros desconfortos decorrentes de ar demasiado seco (NATURAL RESOURCES CANADA, 2012).

A manutenção da qualidade do ar interno implica também na escolha do modo de promover renovação do ar através da ventilação mecânica. A renovação do ar interno de um edifício pode ocorrer através despressurização ou pressurização. Do ponto de vista de saúde, sistemas que despressurizam os edifícios, podem promover a acumulação dos poluentes internos. Dessa forma, sistemas que pressurizam os edifícios são preferíveis a sistemas que despressurizam em termos da qualidade do ar interno segundo Roberson e al. (1998).

Alguns autores defendem que a ventilação mecânica é mais confiável para garantir a renovação de ar que a ventilação natural. Laverge e Janssens (2013) simularam a concentração de poluentes no ar interno de edifícios na Bélgica, comparando o desempenho da infiltração, ventilação natural (abertura de janelas) e ventilação

mecânica. Os autores concluíram que embora a ventilação natural garantisse que a concentração média dos poluentes era inferior aos limites médios, não garantia que os valores máximos permitidos de poluentes fossem ultrapassados em alguns períodos. Kim e al. (2012) simularam o desempenho de sistemas de recuperação de calor de ventilação, sugerem que as vantagens na qualidade interna do ar devem ser avaliadas conjuntamente com as suas vantagens na redução do consumo energético. O VENTILATION AND INDOOR AIR QUALITY TASK GROUP (2012) fez uma revisão da literatura mundial da qualidade do ar interno em edifícios com recuperação de calor sensível. A revisão apresenta comprovação experimental dos benefícios da recuperação de calor sensível na qualidade do ar.

Porém, alguns relatórios que mostram qualidade do ar interno deficiente em edifícios com recuperação de calor sensível (VAN DER PLUIJM, 2012). O relatório conclui que, quando o projeto, instalação e comissionamento dos sistemas de recuperação de calor sensível são corretas, tal apresenta um benefício para a qualidade do ar interno. No entanto, quando erros ocorrem, a qualidade do interno é afetada e tais erros ocorrem com frequência. Um estudo reportou no Reino Unido reportou 50% dos sistemas de recuperação de calor sensível inspecionados instalados de modo contrário, isso é as tomadas de entrada e exaustão de ar estavam invertidas (LOWE e JOHNSTON, 1997). Os erros incluíam deficiente isolamento térmico dos dutos e das próprias unidades dos trocadores de calor. Hill (1998) reportou um caso de uma tomada de ar externo instalada a 2 m de uma fonte de poluentes. Estes resultados são confirmados por Dimitroulopoulou (2012) aponta que medições na Europa mostram que, na prática, a ventilação é deficiente, resultando em taxas de renovação baixas, produzindo em altas concentrações de poluentes e riscos de saúde.

Adicionalmente, a operação incorreta ou negligente dos sistemas de recuperação de calor sensível por os usuários, pode implicar em qualidade insalubre do ar interno. Bone e al. (2010) reportam que somente 76% dos ocupantes operavam a recuperação de calor sensível durante o inverno, 58% durante o verão e 10% nem tinham tomado ciência que possuíam um sistema de recuperação de calor. Gill e al. (2010), em um estudo sobre 25 casas no Reino Unido, reportaram que a maioria somente ligava a ventilação durante os períodos em que o fogão era usado para cozinhar.

O problema do ruído da operação dos ventiladores pode levar ao desligamento das mesmas ou fechamento das entradas dos dutos,

com o intuito de redução do ruído. Tais ações resultam em ventilação deficiente (OP'T VELD e PASSLACK-ZWAANS, 1998). Manz e al. (2000), reportaram a necessidade de melhora das propriedades acústicas das ventiladores das unidades de recuperação de calor. Park e Kim (2012) em um estudo na Coréia, sobre o uso de ventilação mecânica em edifícios residenciais com elevada estanqueidade, reportaram que 8% dos usuários não utilizavam as ventiladores devido ao desconforto provocado por o ruído das mesmas. Van der Pluijm (2012) menciona igualmente o desligamento dos RHV com, forma de lidar com o ruído. O autor reporta igualmente outros motivos que levam os usuários a desligar a ventilação como percepção de baixa umidade ou incomodo com correntes de ar frias. O autor sugere melhoras na automação da operação de sistemas de recuperação de calor de ventilação, embora afirme sobre a necessidade de mais estudos sobre a questão.

Finalmente, Santos e Leal (2012) afirmam que devem ser consideradas particularidades culturais, em relação a edifícios de elevada estanqueidade, na adoção de políticas que promovam sistemas recuperação de calor sensível no sul da Europa. A literatura mostra, portanto, que embora ventilação mecânica com recuperação de calor vise garantir condições de salubridade do ar interno, com frequência tal não se verifica em campo.

### **2.5.3 Eficiência e desempenho de recuperação de calor sensível e recuperação de calor sensível e latente**

Os valores de eficiência dos sistemas de recuperação de calor sensível apresentados na literatura são complexos de interpretar. Raramente na literatura está explícito de que forma foi definida a eficácia do sistema de recuperação de calor de ventilação. Usualmente, as referências à eficiência de operação dos recuperadores de calor parecem reportar a eficiência do trocador de calor. Mardiana-Idayu e Riffat (2012) apresentaram uma revisão sobre recuperação de calor de ventilação, afirmam que os valores de eficiência dos trocadores de calor variam de 60% a 95%. O valor de 95% parece muito elevado. Saari e al. (2012), analisando residências unifamiliares na Finlândia encontraram valores entre 55% a 80%. Igualmente, segundo Saari e al. (2012), estes valores dependem do tipo do trocador de calor. Trocadores de calor com fluxo cruzado apresentam valores de eficiência entre 55% a 60%. Trocadores de calor com contrafluxo ou rotatório aumentam a eficiência para 80%.

Roulet e al. (2001) mediram a eficiência de treze sistemas distintos de recuperação de calor sensível operando em edifícios, analisando quanto calor foi efetivamente recuperado. Os autores analisaram a influência de infiltração, exfiltração e recirculação de ar na eficiência da recuperação de calor. A eficiência média real observada teve valores entre 70% a 60% para uma eficiência teórica de 80%. O pior caso apresentou uma eficiência de 10%. Segundo os autores, um sistema de recuperação de calor sensível com eficiência de 10% usa mais energia que aquela que recupera. É de notar que são escassos os estudos da eficiência de recuperação de calor sensível medida em campo. É também importante notar que, mesmo o valor de eficiência do trocador isolado medido em laboratório, pode diferir em relação ao valor de catálogo, como reportado por Molin e al. (2011) em um estudo de desempenho de edifícios de baixo consumo energético, na Suécia. Adicionalmente, o valor de eficiência de um trocador isolado medido em laboratório por sua vez não corresponde ao valor de eficiência de um sistema de recuperação de calor sensível como um todo, em operação em um edifício.

Adicionalmente, qualquer medida de eficiência de um sistema de recuperação de calor sensível que tem de contabilizar o consumo energético dos ventiladores, juntamente com os benefícios da recuperação de calor segundo El Fouih e al. (2012). Sem contabilizar o consumo energético dos ventiladores não é possível comparar as vantagens dos sistemas recuperação de calor sensível como outros sistemas de climatização. Dessa forma, Pineau e al. (2013) afirmam que a eficiência de sistemas recuperação de calor sensível em climas frios, depende de uma elevada eficiência na recuperação de calor aliada a uma baixa potência dos ventiladores. Segundo Laverge e Janssens (2012) reduzir a potência dos ventiladores entre 50 a 75% em relação aos valores de base (*default*) definidos na EN 1377 tornaria o uso de sistemas de recuperação de calor sensível economicamente viáveis em toda a Europa. Os países da Europa do Sul são aqueles que necessitam de valores mais elevados de eficiência de ventilador. Note-se que os países da Europa do Sul, são aqueles que precisamente apresentam condições climáticas mais próximas do Brasil onde o desconforto térmico por calor é significativo.

O uso de recuperação de calor sensível e recuperação de calor sensível e latente com sistemas de ar condicionado permitem reduzir o consumo energético em climatização e o pico de carga, criando assim um sistema mais eficiente.

Ma e al. (2006) reportam um desempenho 44,5% mais eficiente de um sistema de recuperação de calor sensível e latente comparado com o sistema de ar condicionado simples para uma carga latente de 30%. Para uma carga latente de 42% o aumento de eficiência atinge 73,8%. Os autores afirmam que caso a regeneração da desumidificação (*desiccant regeneration*) ocorra através do aproveitamento da irradiação solar, tal permitiria eliminar a bomba de calor no sistema, resultando em um aumento sensível do COP. Liu (2008) apresenta os resultados do desempenho de um sistema de recuperação de calor e energia com capacidade de refrigeração de 5.6 kW quando operado com somente com recurso à irradiação solar apresenta um COP 13,0. No entanto, o desempenho foi obtido com uma temperatura do ar de 36°C e 50% de umidade relativa dentro de condições controladas de laboratório. Ma e al. (2006) alertam que, embora o aumento o uso da irradiação permita teoricamente aumentar o COP, o desempenho do sistema fica refém das variações climáticas e os custos iniciais do sistema são consideravelmente aumentados.

Mardiana e Riffat (2013) reportam a necessidade de pesquisa sobre os parâmetros de desempenho para recuperadores de calor sensível e latente para melhor avaliar a confiabilidade de aplicação destas tecnologias em edificações.

Estudos recentes, (DODOO e al., 2011; LAVERGE e JANSSENS, 2012), avaliaram o desempenho de sistemas de recuperação de calor e energia comparados com outros sistemas analisando o consumo energético primário. As conclusões dos estudos convergem na conclusão que os resultados estão muito dependentes da composição da matriz e condições climáticas específicas.

O estudo de Laverge e Janssens (2012) analisa a viabilidade do uso de recuperação de calor sensível comparado com ventilação natural e ventilação mecânica simples para energia primária, emissões de CO<sub>2</sub>, viabilidade econômica e exergia. Em termos de energia primária, a viabilidade da recuperação de calor sensível pode depender muito da matriz energética. Os melhores resultados ocorrem para na França (matriz predominantemente nuclear) e na Noruega (matriz predominantemente hidroelétrica).

Os autores concluem que no estado atual somente na Escandinávia a recuperação de calor sensível e latente apresenta vantagens em quase todos os cenários de diferenças de pressão e potência de ventilador. Para climas centro europeus os autores concluem que recuperação de calor sensível e latente não apresenta

vantagens em energia de operação, emissões associadas ou econômicas, a não ser que seja possível atingir recuperação de calor com ventiladores de baixa potência. Finalmente, na bacia mediterrânea, somente com sistemas com simultaneamente baixa diferença de pressão e ventiladores de baixa potência os sistemas recuperação de calor sensível e latente apresentam vantagens perante a ventilação natural e ventilação mecânica simples. No entanto, caso as melhores práticas relativas a baixas potências de ventilador forem adotadas, a recuperação de calor sensível e latente torna-se a melhor opção em relação a consumo energético primária, emissões e custo da energia de operação em toda a Europa. É de salientar que este estudo se baseia em modelos matemáticos e não resultados medidos em campos.

#### **2.5.4 Fatores que afetam a eficiência de operação de recuperadores de calor e calor sensível e latente em edifícios**

El Fouih e al. (2012) mostram, em uma revisão da literatura, que redução de consumo energético decorrente do uso de recuperadores de calor e calor sensível e latente em edifícios tem de levar em conta diferentes parâmetros, como clima local, propriedades físicas dos edifícios, taxa de ventilação e as características do sistema de recuperação de calor.

Mardiana e Riffat (2013) apresentam uma revisão dos fatores que afetam o desempenho dos recuperadores de calor para edifícios. Sobre os efeitos das características do sistema na eficiência, os autores mostram que depende de vários fatores incluindo, a dimensão e área disponíveis para transferência de calor, o material utilizado (metálico, polímeros, fibrosos, membranas), configuração dos elementos do trocador de calor com presença de aletas ou pavios (*wicks*), como pode ser visto na Figura 11, ou superfícies corrugadas.

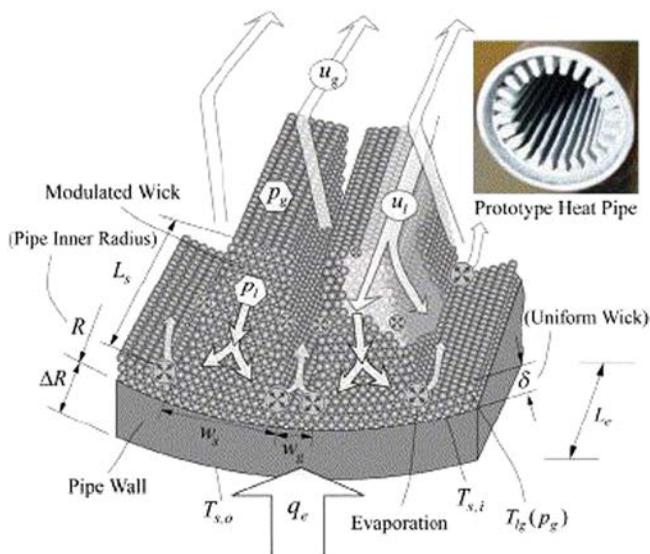


Figura 11: Exemplo de configuração interna de elemento de trocador de calor.

Fonte: Mardiana e Riffat (2013).

Os autores listam, também, a relação geométrica entre os elementos dos trocadores de calor, como outro fator que impacta o desempenho do trocador de calor. Os elementos conduzindo o ar de entrada, podem ser colocados em fluxo cruzado com os elementos contendo o ar de saída, ou em contrafluxo (na mesma direção, mas com o ar de entrada e saída fluindo em sentidos distintos). A organização em contrafluxo resulta em maior eficiência na recuperação de calor.

Finalmente, embora o trocador de calor seja o núcleo do recuperador de calor, a sua operação implica também um sistema que promova a movimentação do ar e dutos para condução do ar. Assim é

necessário considerar a influência das ventiladores e os dutos no desempenho dos recuperadores de calor (MARDIANA e RIFFAT, 2013).

A operação do ventilador também consome energia. O consumo energético da ventilador é, frequentemente, o determinante da viabilidade energética total do sistema, segundo Laverge e Janssens (2012)

Kim e al. (2012) abordam outro fator que afeta o desempenho. Segundo os autores, realizando simulações para edifícios residenciais uni e multifamiliares, a operação contínua dos recuperadores de calor garante um melhor desempenho. Para operação parcial, quanto maior o número de horas o sistema de recuperação de calor sensível está em operação, melhor o desempenho. Este estudo parece não menciona a utilização de arrefecimento livre (*free cooling*, ou seja, utilizar o ar externo sem recuperação de calor, quando a temperatura externa está dentro dos limites definidos na temperatura de controle).

A escolha das temperaturas de controle de um sistema de recuperação de calor sensível e latente afeta, também, a sua eficiência de acordo com Zhou e al. (2007). Em um estudo para Pequim e Xangai, os autores mostram que a redução da temperatura de controle em Xangai, aumentou a eficiência do resfriamento, reduzindo o consumo energético de climatização. Santos e Leal (2012), também verificaram a redução do consumo energético de climatização, com redução da temperatura do temperatura de controle mínimo, para residência unifamiliar para Helsinque e Lisboa.

O desempenho real da recuperação de calor sensível depende, igualmente, da configuração do edifício em termos de estanqueidade e isolamento térmico do envelope e sua relação como clima (DIMITROULOPOULOU, 2012; RASOULI e al., 2013).

Manz e al. (2001) alertam que a eficiência e o desempenho têm de ser garantidos, quando diferenças e pressão entre o interior e o exterior ocorrem, por induzidas por vento ou origem térmica. A taxa efetiva de ventilação pode ser reduzida devido a tais diferenças de pressão, que também podem influenciar a qualidade do ar interno. Misturas não planejadas entre o ar de entrada e saída, através de dutos mal vedados, reduzem, igualmente, a eficiência do sistema. Pontes térmicas não previstas no próprio trocador de calor, podem, também, reduzir a eficiência. Tais pontes podem ocorrer através dos ventiladores, adicionalmente. As simulações frequentemente não levam em conta estes fatores.

### 2.5.5 Recuperação de calor e calor sensível e latente em climas quentes

A recuperação de calor e calor sensível e latente foi aplicada primeiramente em climas frios. No caso de climas frios a recuperação de energia, no sentido de recuperação de calor latente, não é usualmente utilizada. Nos climas frios, a umidade do ar é reduzida. Assim, o calor latente não é significativo nas trocas de calor, recaindo a opção no uso de recuperadores de calor que recuperam somente calor sensível. Rasouli e al. (2013) estimaram um consumo energético de climatização, no inverno, 5% maior no uso de recuperação de calor sensível e latente comparado com recuperação só de calor sensível.

Os climas frios apresentam condições mais favoráveis para a recuperação de calor quando comparados com climas quentes. Usualmente, a diferença entre temperaturas interna e externa é maior em climas frios que em climas quentes. Tal fato aumenta a eficiência da recuperação de calor. Segundo Laverge e Janssens (2012), este é o caso nas condições climáticas europeias onde a magnitude da recuperação de calor para refrigeração nas regiões quentes da Europa é sensivelmente inferior à obtida com a recuperação de calor para aquecimento nos climas mais frios da Europa.

Zhong e Kang (2009) apresentam resultados equivalentes em simulações feitas para os diversos climas da China. Os autores utilizaram um recuperador de calor sensível e latente para reduzir o consumo energético de um sistema de condicionamento de ar convencional. Dada a extensão climática da China, incluindo climas de frio severo até climas quentes e úmidos, o território foi dividido em regiões dependendo do tipo de inverno e verão. Os climas variam de frio severo (*severe cold*) até verão quente com inverno ameno (*warm*). Os autores reportam que, a economia de energia sensível em climas severos frios, é seis vezes maior, que em climas de verão quente e inverno ameno.

A literatura que enfoca climas onde a necessidade de refrigeração é significativa tende a enfatizar os climas quentes e úmidos e o uso de recuperação de calor sensível e latente. Nestes casos, a desumidificação do ar é desejável, dada a importância do calor latente. No entanto, a utilização de recuperação de calor sensível e latente, em climas quentes e úmidos, não garante um menor consumo energético de climatização, comparado com a climatização artificial sem recuperação de calor, segundo Rasouli e al. (2013). Em um estudo para

quatro cidades norte-americanas (Chicago, Helena, Miami e Phoenix, representando climas frios e quentes úmidos e secos) Rasouli e al. (2013) constataram que os parâmetros de operação podem provocar um consumo maior de energia de climatização com recuperação de calor. Os autores sugerem uma estratégia de controle de recuperação de calor sensível e latente que leva em conta a relação entre calor sensível e latente no ar introduzido no edifício. Utilizando a estratégia de controle proposta, foi observada uma redução de consumo energético de climatização de 15% através de um recuperador de calor sensível e latente para Miami, um clima quente e úmido. Outros autores reportam conclusões semelhantes (ZHONG e KANG, 2009; ZHOU e al., 2007). É de notar que estes estudos não focam edifícios residenciais unifamiliares. Como solução específica para residências unifamiliares de energia zero, Chen e al. (2012) sugeriram um sistema que pode agir como recuperador de calor sensível ou sensível e latente para residências unifamiliares de energia zero.

Especificamente para residências unifamiliares, três estudos enfocam a relação entre isolamento, taxa de ventilação e consumo energético par climas quentes, na Europa, com foco no clima mediterrâneo. Schnieders (2009) sugere redução do isolamento térmico, aumento da renovação de ar como forma de reduzir o consumo energético em climatização para o sul da Europa. Estes resultados são similares às conclusões do estudo PASSIVE ON (2007a). Santos e Leal (2012) apresentam um estudo dos efeitos na energia de climatização, com uso de recuperação de calor. O estudo apresenta vários cenários, com diferentes taxas de infiltração, temperaturas de controle de calor e frio, estratégias de controle da recuperação de calor e distintos valores de umidade. O estudo pesquisou Helsinque, Lisboa e Paris. O estudo foi feito para quatro tipologias (residência unifamiliar, apartamento, escritório e escola).

Nos resultados para residência unifamiliar em Lisboa (a cidade de clima mais ameno), a taxa de infiltração não teve influência significativa no consumo energético em climatização agregada final, ao contrário de Helsinque e Paris. No entanto, para refrigeração, taxas maiores de infiltração implicaram em menor consumo energético de refrigeração para residência unifamiliar em Lisboa. Estes resultados são congruentes com os resultados dos estudos de PASSIVE ON (2007a) e Schnieders (2009).

## 2.6 ESTUDOS E EXEMPLOS DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO

A primeira referência do uso da denominação edifício de energia zero encontrada na revisão ocorreu em 1975 na Dinamarca com a *Nullenergihuset* (Casa de Energia Zero). A Casa de Energia Zero foi um edifício residencial de pesquisa construído pela Universidade Técnica da Dinamarca (ESBENSEN e KORSGAARD, 1977; SEIFERT, 2008). Embora este edifício tenha sido pioneiro no uso da denominação edifício de energia zero, energia zero neste caso referia-se somente a energia de climatização. Dessa forma, é discutível a utilização da denominação edifício de energia zero nos termos atuais.

Segundo Charron e Athienitis (2006) o primeiro edifício de energia zero conectado à rede data de 1980. A casa Carlise o sistema gerador de energia deste edifício utilizava um sistema de geração fotovoltaico de 7,5 kWp de potência e 14 m<sup>2</sup> de coletores solares.

São necessários 20 anos mais para surgirem referências a edifício de energia zero. Isamu (2000) descreve a Casa de Energia Zero (*Zero Energy House*), um edifício de energia zero solar pré-fabricado construído no Japão. Este edifício de energia zero apresentava um sistema de geração fotovoltaica com potência de 10 kWp, sistemas de ar condicionado e água quente doméstica através de bombas de calor para maior eficiência. A cozinha utilizava um fogão de indução. O isolamento térmico foi duplicado em relação à prática de mercado japonesa naquela época. Segundo o autor, este edifício ultrapassava a marca de edifício de energia zero, gerando mais energia que a consumia em um ano.

Em 2001, nos Estados Unidos um projeto de demonstração na zona de Washington DC, tentava alcançar a marca edifício de energia zero segundo Parker (2009). A Casa Solar Patriota (*Solar Patriot House*) ou Casa Hathaway (Figura 12) foi construída para mostrar o potencial de edificações eficientes num clima misto.



Figura 12: Fotografia da Casa Hathaway. Fonte: Parker (2009).

A Casa Hathaway estava equipada com um sistema de geração fotovoltaica de 6 kWp, isolamento térmico de paredes e fundações, com janelas utilizando vidros de baixa emissividade. O aquecimento de água doméstica utilizava coletores solares com tubos evacuados e a climatização utilizava uma bomba de calor geotérmica para reduzir as cargas de climatização. A casa, no entanto, não conseguiu alcançar a marca edifício de energia zero, consumindo 10585 kWh em 2002 enquanto gerou somente 7510 kWh nesse período.

Contudo, a casa foi extensamente monitorada por usos finais de energia, fornecendo bastante informação sobre o consumo energético na edificação. A Figura 13 mostra os resultados desse monitoramento. Mostra a importância do consumo advindo de equipamentos conectados em tomadas (*plug loads*). Este valor não está muito distante dos valores estimados sobre usos finais brasileiros para o item outros equipamentos na literatura.

Parker (2009) comentou que uma das conclusões da análise dos dados foi a falta de investimentos adicionais em eficiência energética que se mostrariam mais econômicos na obtenção da redução de consumo energético.

A Figura 13 apresenta os consumos energéticos por uso final da casa Parker.

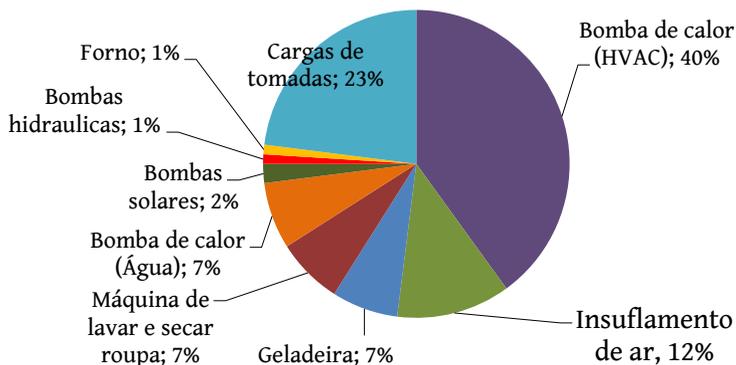


Figura 13: Usos finais de energia na Casa Hathaway. Fonte: Parker (2009).

A comparação das especificações da Casa de Energia Zero japonesa e da Casa Hathaway ilustram enfoques distintos no Japão e Estados Unidos sobre edifícios eficientes. A rigor a revisão não encontrou referências a uma política de especifica de promoção edifício de energia zero japonesa ao contrário dos Estados Unidos e Europa.

Todavia, em meados da década de 1990, o governo japonês iniciou um programa bem-sucedido de incentivo à instalação de módulos fotovoltaicos em edifícios residenciais. Este programa possibilitou que, durante o período de vigência deste programa, os fabricantes japoneses de módulos se transformassem nos maiores do mundo e o país tomasse a dianteira na capacidade fotovoltaica instalada (FOSTER, 2005)<sup>10</sup>.

Adicionalmente, o mercado japonês apresenta as maiores eficiências mundiais em sistemas de condicionamento de ar (ECODESIGN PREPARATORY STUDY ENTR LOT 6, 2012). Companhias japonesas também são responsáveis pelo lançamento comercial de tecnologias novas como bombas de calor de CO2 integradas para aquecimento de água. O resultado da confluência destas políticas

<sup>10</sup> O programa terminou na década de 2000.

resulta em edifício de energia zero em alguns casos, mesmo na ausência de uma política específica.

No entanto, a falta de um programa específico para construção de edifício de energia zero Japão parece implicar um abandono do uso de técnicas passivas de projeto, demonstrado pelo menor isolamento térmico de envelope descrito no artigo de Hamada e al. (2003).

Pesquisa para edifício de energia zero em condições climáticas frias são igualmente presentes na bibliografia. Estas pesquisas incluem estudos de viabilidade (IQBAL, 2004) como projetos efetivamente construídos e posteriormente monitorizados (CHARRON; ATHIENITIS, 2006; HOQUE, 2010; NORTON; CHRISTENSEN, 2008; NORTON e al., 2008).

Hoque (2010) apresenta um estudo de dois edifícios residenciais unifamiliares projetados e construídos com o objetivo de atingir a marca edifício de energia zero. Os dois edifícios foram construídos no noroeste dos Estados Unidos no estado do Massachusetts com o objetivo de atingir a marca edifício de energia zero local. Cada um dos edifícios, no entanto, tem um projeto e sistemas bastante distintos. Da comparação dos dois edifícios, o autor concluiu pela necessidade da criação de definição para edifício de energia zero que levem em conta a utilização de estratégias passivas de projeto, saúde dos ocupantes, conforto e durabilidade. Estas definições seriam necessárias para generalizar a adoção de edifício de energia zero no mercado.

## 2.7 EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO E PADRÕES DE USO

A bibliografia revisada sobre edifício de energia zero não encontrou um debate aprofundado sobre o papel do usuário para atingir a marca de energia zero. Existem menções à necessidade da busca de eficiência energética em edifício de energia zero, particularmente para edifício de energia zero locais. Está ausente um debate profundo de como o usuário pode influenciar o consumo a ponto de impedir atingir a marca de energia zero. Somente duas menções à importância do usuário foram encontradas.

Os efeitos do usuário no balanço energético de edifício de energia zero podem ser extensos e ocorrer de diversas formas. Os efeitos do usuário no balanço energético não se esgotam na comparação do consumo energético de distintos usuários utilizando edifícios idênticos. A influência pode ocorrer para o mesmo edifício com os mesmos usuários. Uma residência unifamiliar edifício de energia zero pode começar o seu ciclo de vida habitada por um casal

que posteriormente tem filhos. Tal mudança afeta o padrão de uso. Meier (2011) mostra as tais alterações de consumo energético de uma residência unifamiliar na Florida ao longo de um período de vinte anos (Figura 14).

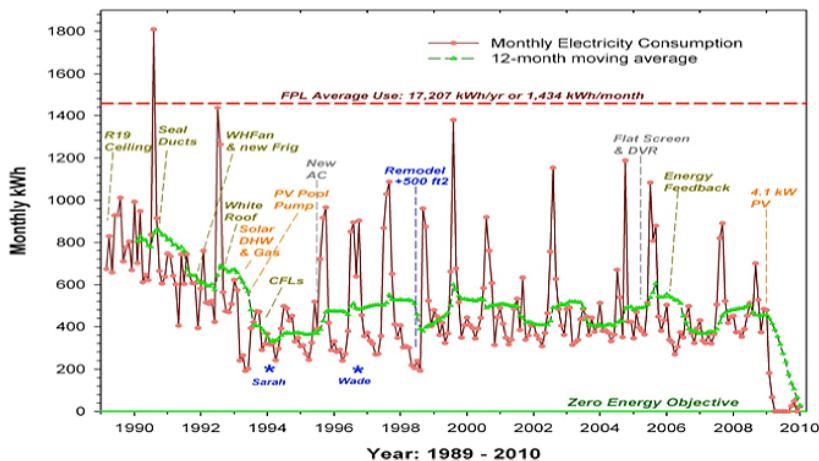


Figura 14: Consumo elétrico de uma residência unifamiliar ao longo de vinte anos. Fonte: Meier (2011).

Os proprietários da residência Parker eram preocupados com a aplicação de medidas de eficiência energética. Um dos proprietários da residência é pesquisador na área de eficiência energética em edificações. Várias medidas de eficiência energética foram sendo aplicadas ao longo dos anos. Ao se mudarem para a sua residência em 1979 o seu consumo médio anual era aproximadamente de 10.000 kWh. Este consumo era bastante inferior ao consumo da área (Florida), mas é o valor de consumo energético médio residencial anual norte americano.

Da análise dos dados, Meier (2011) apresenta alguns pontos para considerar baseado nos dados do gráfico:

- O progresso para energia zero é acidentado e nem sempre as flutuações no consumo parecem corresponder à instalação de medidas de conservação. São necessárias melhores ferramentas para acompanhar o progresso em direção às metas de eficiência;
- São necessárias várias medidas de eficiência para reduzir significativamente o consumo de eletricidade. Políticas sobre eficiência devem ser abrangentes;
- Alguns aumentos de consumo são positivos. O nascimento das duas crianças parece ter aumentado o consumo (por outro lado o consumo per capita de eletricidade reduziu 50%). Embora tal não seja uma surpresa, esta ligação deve ser lembrada nas políticas energéticas. Devem ser previstas disposições para acomodar os aumentos de consumo positivos;
- Aumento em 25% em área construída sem aumento significativo no consumo energético. Além de novas construções as políticas energéticas devem focar renovações;
- Eletrodomésticos mais importantes, como a geladeira, necessitaram de serem trocados duas vezes durante vinte anos. Isto significa duas oportunidades para melhorar eficiência (dentro de um período de vinte anos) dos eletrodomésticos. Responsáveis por políticas energéticas devem esperar visitar cada residência diversas vezes;
- No verão, o consumo elétrico ainda excede o fornecimento disponível. Dessa forma, políticas energéticas devem levar em consideração o consumo de pico assim como a média. (Este ponto fica claro olhando a Figura 14. Após a instalação de um sistema fotovoltaico de 4,1 kWp em 2009, o consumo é nulo exceto no verão de 2009).

Estas conclusões mostram a complexidade na definição do balanço zero de energia durante vários anos para uma mesma edificação com os mesmos proprietários. É também necessário deixar

claro que a residência Parker serve como um estudo de caso de melhores práticas. Afinal é propriedade de um pesquisador da área. Tal significa que o proprietário tinha a formação, informação atualizada e motivação para a busca de eficiência ao longo de duas décadas. A maioria ao dos usuários não congrega estes fatores. Mesmo para usuários como motivação sem informação e formação correta sobre o uso das várias tecnologias de eficiência os resultados na redução de consumo energético não serão tão positivos.

O problema da correta informação e formação dos usuários transcende busca de redução de consumo energético. Pode definir o sucesso da implantação em larga escala do edifício de energia zero. Mlecnik e al. (2012) avaliaram a satisfação pós ocupação de edifícios residenciais quase zero na Holanda. Vários parâmetros de conforto foram avaliados. Especificamente, conforto térmico no inverno, conforto térmico no verão, qualidade interna do ar e acústico. As conclusões mostraram que conforto térmico no verão e a qualidade (e informação sobre) os sistemas de aquecimento e ventilação são fatores críticos a serem resolvidos para melhorar a satisfação dos usuários em edifícios quase zero. Note-se que o conforto térmico no verão (sobreaquecimento) foi o fator principal de insatisfação. Tal decorre do uso da estratégia do superisolamento que pode conduzir a sobre aquecimento mesmo na Holanda.

Adicionalmente, as consequências do aquecimento global, como a onda de calor anômalo no verão de 2003 na Europa, mostram a premência do tema mesmo nos países de clima frio.

## 2.8 MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO

Os modelos de conforto térmico definem intervalos de temperatura onde preveem condições de conforto térmico para um percentual pré-definido das pessoas exposta a determinadas condições climáticas.

Não existe um modelo unificado e abrangente de conforto térmico para aplicação generalizada. Existem diversos tipos de modelos para conforto térmico. Alguns modelos de conforto enfocam o entendimento fisiológico das trocas de calor no corpo com o ambiente e enquanto outros enfocam a previsão do estado psicológico do conforto térmico (CHENG e al., 2012). Os modelos também podem ser divididos dependendo do contexto de aplicação. Alguns modelos enfocam conforto em ambientes externos como (JENDRITZKY e al., 2012; MAYER; HÖPPE, 1987), outros enfocam a ambientes transientes

(ARENS e al., 2006; KAYNAKLI; KILIC, 2005). Existem modelos para aplicação específica como no contexto automotivo (ALAHMER e al., 2011; LEE e al., 2014) ou aeronáutico (LIPING e al., 2013; WINZEN; MARGGRAF-MICHEEL, 2013).

O presente trabalho foca unicamente os modelos para conforto interno em edifícios. Alguns modelos de conforto térmico definem intervalos de conforto térmico onde os limites superiores e inferiores de temperatura são fixos (modelos estáticos). A ISO 7730, baseada no trabalho de Fanger, é um exemplo de modelo estático.

Outros modelos, os modelos adaptativos, alteram dinamicamente os valores limites superiores e inferiores de temperatura dos intervalos de conforto térmico. A alteração dos limites dos intervalos de conforto térmico é determinada através das condições climáticas externas vigentes no passado imediato. Para cada dia, os dados climáticos dos dias imediatamente anteriores são utilizados para definir os limites superiores e inferiores de temperatura do intervalo de conforto. Como exemplo, EN 15251 (2007) e a ASHRAE 55 (2010) (na seção sobre avaliação de ambientes naturalmente condicionados), utilizam uma média corrente os dados de temperatura externa dos dias anteriores para definir os limites superiores e inferiores das temperaturas de conforto em cada dia, baseados no trabalho de De Dear (2006). A EN 15251 (2007) utiliza os sete dias imediatamente anteriores ao dia designado para cálculo dos limites de conforto. A ASHRAE 55 (2010) apresenta várias opções, deixando ao critério de quem usa a norma.

ASHRAE 55 (2010) é baseada nas conclusões do projeto de pesquisa da ASHRAE RP-884, uma base de dados contendo mais de 20 000 entradas de dados, correlacionando dados climáticos internos, conforto térmico e temperaturas externas, mostrou uma correlação entre declarações de conforto térmico e temperatura externa. A EN 15251 (2007) por sua vez, é baseada em dados de temperatura e conforto coletados unicamente na Europa, tendo menor abrangência.

### **2.8.1 ASHRAE 55**

A ASHRAE 55 é uma norma de conforto térmico. Esta norma é atualizada regularmente e, desde 2004, inclui um modelo adaptativo de conforto térmico. Este modelo é fornecido como opção para avaliação de conforto térmico de ambientes naturalmente ventilados, em paralelo a um modelo fixo de conforto térmico.

O modelo estático de conforto térmico define intervalos fixos de temperatura no qual prevê condições de conforto térmico. Para um modelo estático, este intervalo de temperatura é invariante e válido em todo o mundo. O modelo estático foi estabelecido a partir de pesquisas em câmaras climáticas em condições de temperatura e umidade controladas.

Em contrapartida, o modelo adaptativo define intervalos variáveis de temperatura, nos quais prevê conforto térmico. A variação do intervalo de temperatura é determinada pelas condições climáticas progressas exteriores, que determinam o intervalo de temperatura de conforto térmico. A variação constante das condições climáticas externas implica uma variação constante do intervalo de temperatura de conforto térmico. O modelo adaptativo foi estabelecido através de uma base de dados com dezenas de milhares de entradas, de abrangência mundial, de pesquisas de conforto térmico em edifícios.

O modelo de conforto térmico adaptativo na ASHRAE 55 (2010), a versão atual da norma, utiliza duas temperaturas: a temperatura de bulbo seco média do ar externo e a temperatura operativa do ar interno. A temperatura operativa é uma medida agregada que inclui na sua composição temperatura do ar e a temperatura radiante, contabilizando incluindo assim as trocas de calor por convecção e radiação.

A ASHRAE 55 (2010) determina dois intervalos de temperatura de conforto térmico, apresentados na Figura 15. Um intervalo com 90% de aceitabilidade (área cinza), apresentado a título indicativo. O outro intervalo com 80% de aceitabilidade (áreas cinza mais azuis) deve ser utilizado para definir conforto térmico.

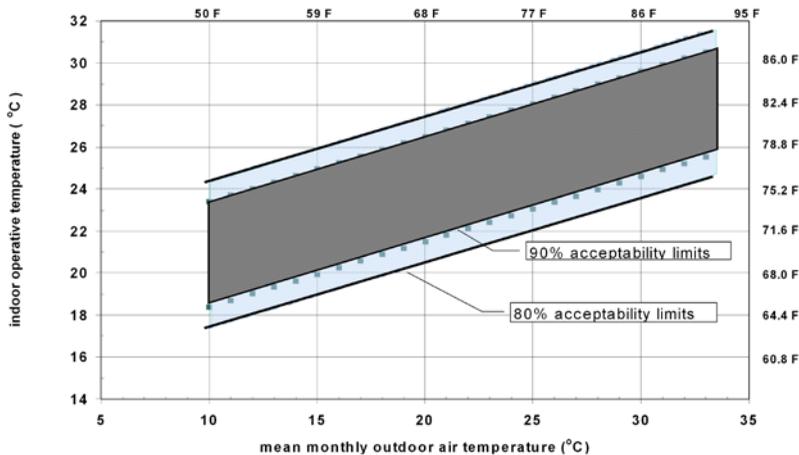


Figura 15: Limites aceitáveis para intervalos de temperatura operativa em espaços naturalmente condicionados. Fonte: ASHRAE 55 (2010).

A determinação dos limites inferior e superior de cada intervalo de conforto é determinada a partir de uma temperatura de referência (*prevailing mean outdoor air temperature*). A temperatura de referência é utilizada em equações lineares que definem os valores dos limites superiores e inferiores do intervalo de conforto térmico. Os limites de cada intervalo são simétricos em relação à temperatura de referência. Dessa forma, os limites superiores são determinados somando e subtraindo o mesmo valor à temperatura de referência. Somando 2,5 °C à temperatura de referência de define o limite superior do intervalo de temperatura de conforto térmico com 90% de aceitabilidade. Subtraindo 2,5 °C à temperatura de referência de define o limite inferior. Para a mesma temperatura de referência, a diferença entre o limite inferior e superior é constante com o valor de 5,0 °C. Os limites superior e inferior do intervalo de temperatura com 80% de aceitabilidade são determinados de forma similar utilizando o valor de 3,5 °C ao invés de 2,5 °C.

Esta configuração decorre de dois conjuntos de equações lineares. Um conjunto define o intervalo de 80% de aceitabilidade e

outro para calcular um intervalo de 90% de aceitabilidade segundo a ASHRAE 55 (2010). A Equação 2 apresenta a determinação do limite superior de 90% de aceitabilidade e a Equação 3 o limite inferior para um intervalo de 90% de aceitabilidade.

$$\begin{aligned} \text{Limite superior 90\% de aceitabilidade} = & \text{Equação 2} \\ 0,31 \times (\text{temperatura de refer\^encia}) + 20,3 & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Limite inferior 90\% de aceitabilidade} = & \text{Equação 3} \\ 0,31 \times (\text{temperatura de refer\^encia}) + 15,3 & \end{aligned}$$

A análise da Equação 2 e Equação 3, confirma que o que Figura 15 ilustra. Os limites, inferior e superior, são definidos por equações lineares com a mesma inclinação (0,31) correspondendo a retas paralelas com origens diferentes.

Para calcular os limites dos intervalos de conforto térmico é necessário o cálculo anterior da temperatura de referência. A temperatura de referência de cada dia utiliza os últimos dias imediatamente anteriores. Para formação da média, podem ser usados últimos sete a trinta dias. A norma sugere o cálculo da média através de média aritmética simples, embora permita médias exponenciais (com  $\alpha$  entre 0,6 a 0,9).

Em qualquer das opções, a temperatura de referência é definida através de média das temperaturas externas dos dias imediatamente anteriores. Dessa forma, a temperatura de referência oscila de dia para dia e, conseqüentemente, os limites inferiores e superiores do intervalo de conforto também oscilam diariamente.

A Figura 16 apresenta um exemplo da temperatura de conforto para uma zona térmica de um edifício em Curitiba no mês de janeiro. No presente caso, a temperatura de referência é calculada através de uma equação exponencial, contabilizando os últimos sete dias. Neste caso, a temperatura operativa (linha vermelha tracejada) permanece dentro da zona de conforto durante todo o mês (linha verde clara e linha verde escura).

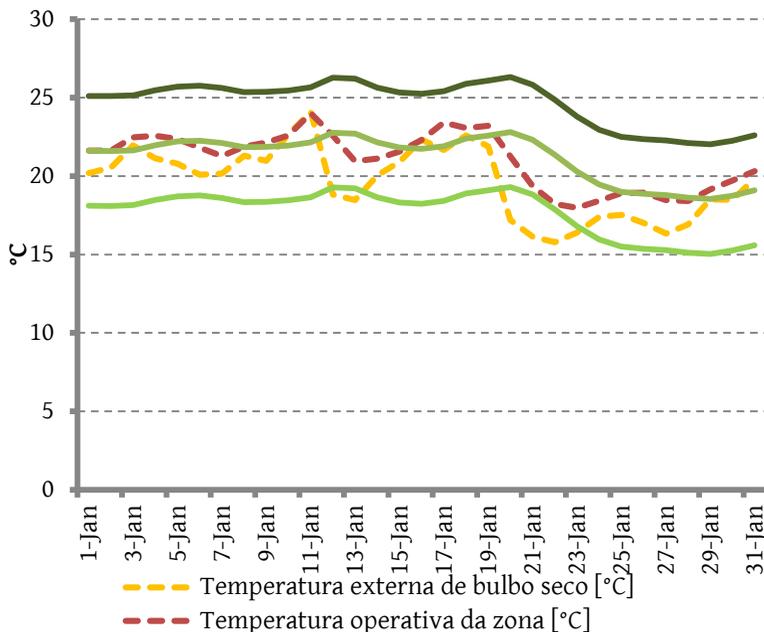


Figura 16: Exemplo de intervalo de conforto adaptativo com equação exponencial para o mês de janeiro em Curitiba.

Fonte: De Vecchi e al., 2014.

### 2.8.2 Análise crítica da ASHRAE 55

Os modelos adaptativos como a ASHRAE 55 (2010) assumem que o usuário e a sua fisiologia reagem ao contexto térmico no qual estão inseridos. Dessa forma, nos modelos adaptativos, o metabolismo, grau de isolamento das roupas não são explicitamente contabilizados. Assume-se que esses efeitos já estão contabilizados nas equações ilustradas na Figura 15, segundo a adenda d da ASHRAE 55 (2010). Isto é, que o efeito agregado regulação pelos usuários de sua atividade e grau de isolamento da roupa com conjugado à adaptação fisiológica resulta em condições de conforto térmico para os usuários. O mesmo raciocínio é aplicado para velocidade do ar e umidade e, desde a adenda d da ASHRAE 55 (2010), para desconforto térmico localizado.

No entanto, da mesma forma, que a ASHRAE 55 (2010) afirma que os efeitos da velocidade do ar estão computados na equação, a própria norma estende o limite superior do intervalo de conforto para temperaturas maiores que 25 °C para velocidades do ar mais elevadas. Três faixas de velocidades do ar são apresentadas sendo que quanto maior o limite superior da faixa, maior a extensão da temperatura de conforto.

Em relação à umidade, não feitas menções a limites inferiores e superiores de umidade. Umidade relativa inferiores a 14% apresentam riscos para a saúde sendo 30% de umidade relativa, considerado o limite inferior salubre. Pode-se argumentar falta de um limite inferior para umidade na ASHRAE 55 (2010) é lícito visto que a norma versa sobre conforto térmico e não sobre salubridade do ar. Baixa umidade não interfere na sensação de conforto térmico. No entanto, em condições de calor, umidades relativas mais baixas permitem maior perda de calor, permitindo conforto em temperaturas mais elevadas comparado com umidades relativas mais elevadas. Da mesma forma que a ASHRAE 55 (2010) permite estender os limites superiores de temperatura para velocidades maiores do ar, deveria contemplar os efeitos no conforto térmico de diferenças de umidade do ar, diferenciando climas quentes secos de climas quentes úmidos. Não considerar a umidade especificamente, é uma limitação da ASHRAE 55 2010.

As taxas metabólicas descritas para aplicação da norma são também demasiado estreitas, 1,0 a 1,3 Met. Estes valores excluem deitar como forma de adaptação aos períodos mais quentes do dia. Adicionalmente qualquer atividade realizada em pé com algum tipo de

movimento está excluída também, excluindo, em termos estritos, um número de atividades domésticas do âmbito da aplicação.

### 2.8.3 Cálculo de graus hora de desconforto

O método dos graus horas permite quantificar o desconforto térmico dentro de um período de tempo. Os limites do intervalo de conforto permitem somente separar temperaturas de conforto das temperaturas de desconforto. No entanto, os limites do intervalo, não permitem, por si só, estimar o grau de desconforto. Dado um dia determinado, a temperatura pode ultrapassar o limite de desconforto em um grau ou vários. Adicionalmente, os intervalos de conforto podem ser ultrapassados somente em alguma hora pontual ou durante todo o período considerado.

O método dos graus horas de desconforto permite analisar esta questão. O método dos graus hora busca os períodos em que a temperatura interna ultrapassa os limites (inferior ou superior) do intervalo de conforto térmico. Sempre que tal ocorre, a temperatura da zona interna é subtraída ao valor do limite ultrapassado.

A equações 4 e 5 formulam a definição de graus hora de refrigeração e aquecimento, respectivamente.

$$\begin{aligned} & \text{Graus hora}_{\text{refrigeração}} = \\ & \sum_{i=1}^n (T_j - T_{\text{limite superior}})_i \forall (T_{\text{limite superior}} \leq T_j)_i \end{aligned} \quad \text{Equação 4}$$

$$\begin{aligned} & \text{Graus hora}_{\text{aquecimento}} = \\ & \sum_{i=1}^n (T_{\text{limite inferior}} - T_j)_i \forall (T_{\text{limite inferior}} \geq T_j)_i \end{aligned} \quad \text{Equação 5}$$

A Figura 17 ilustra os graus hora para um mês usando um intervalo de conforto fixo. As áreas coloridas abaixo da linha azul e acima da linha vermelha na Figura 17, ilustram respectivamente, os graus-hora de frio e de calor e para um intervalo de conforto de 21 °C a 23 °C.

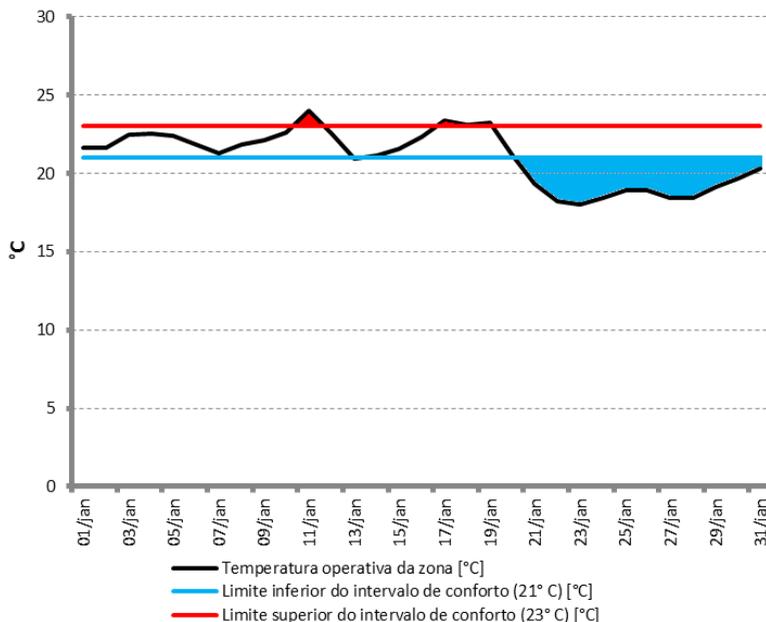


Figura 17: Exemplo de graus-hora com limites de conforto constantes para o mês de janeiro em Curitiba.

Fonte: De Vecchi e al. (2014).

O número de graus hora depende da definição dos valores dos limites do intervalo de conforto térmico. Quanto menor a distância entre os limites, inferior e superior, do intervalo de conforto térmico maior o número de graus-hora. Limites inferiores e superiores de temperatura constantes remetem a modelos estáticos de conforto térmico.

O cálculo de graus-hora de desconforto térmico neste trabalho utiliza limites dinâmicos para definição do intervalo de conforto térmico. O uso de limites dinâmicos decorre da avaliação do conforto térmico através do modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2010). Como tal,

os limites de conforto são os limites de 80% de aceitabilidade da norma. Como estes limites são definidos através de uma média corrente baseada nas temperaturas externas pregressas, decorre que os limites variam. A Figura 18 ilustra o mesmo mês apresentado na Figura 17 com os limites, superior (a vermelho) e inferior (cor azul), e intervalos de conforto dinâmicos.

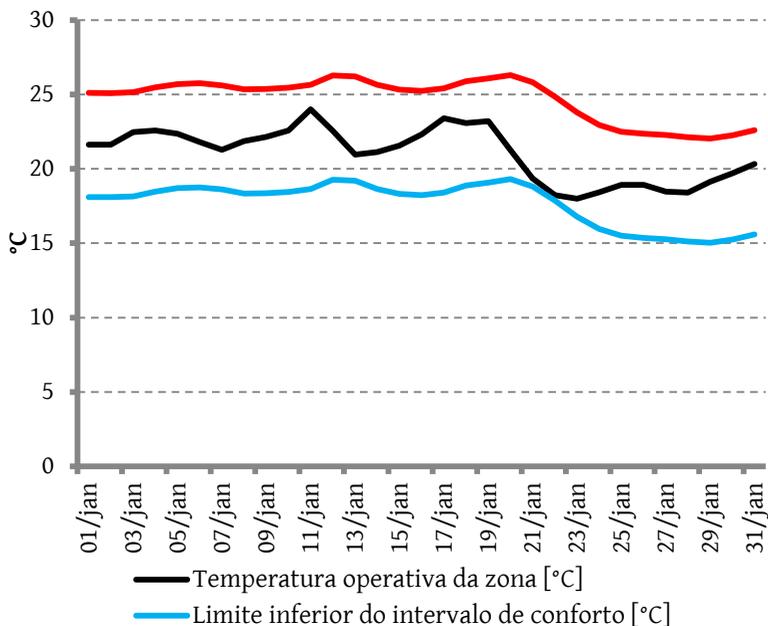


Figura 18: Exemplo de graus-hora com limites de conforto variáveis definidas por conforto adaptativo para o mês de janeiro em Curitiba.

Fonte: De Vecchi e al. (2014).

A Figura 18 mostra a mesma temperatura interna apresentada na Figura 17. No entanto, ao contrário do que sucede na Figura 17, a temperatura permanece dentro dos limites do intervalo de conforto térmico como consequência do uso do modelo adaptativo. Convém salientar a temperatura nas figuras 3 e 4 é a temperatura operativa. Usualmente é utilizada temperatura do ar ao invés da temperatura operativa. No entanto, o modelo operativo da ASHRAE 55 (2010) usa temperatura operativa. A temperatura operativa contabiliza temperatura do ar e radiante, sendo por isso uma melhor medida para conforto térmico.

## 2.9 SIMULAÇÕES E MONITORAMENTO DE EDIFÍCIO DE ENERGIA ZERO EM CLIMAS QUENTES

Zhu e al. (2009) analisaram o desempenho energético e econômico de um edifício de energia zero residencial unifamiliar construído na zona suburbana de Las Vegas, um clima quente e seco. O edifício de energia zero foi construído ao lado de uma habitação construída de acordo com a prática usual, para servir de parâmetro de comparação. As simulações apresentadas no artigo partiram dos dados de desempenho dos dois edifícios recolhidos em campo durante o período de um ano. Tal procedimento teve como objetivo garantir uma maior margem de confiança nos resultados das simulações. Esses resultados foram depois usados como base para as avaliações de viabilidade econômica. As simulações de desempenho energético utilizaram dois software distintos: E-Quest e Energy 10. A avaliação econômica foi feita através do payback.

Os resultados da avaliação energética mostram que barreira radiante e um sistema de climatização autores salientam que paredes com elevada massa térmica, mostraram-se economicamente inviáveis com um payback de 634 anos. As paredes também acumularam mais calor durante o dia que aquele que conseguiam libertar durante a noite. No entanto, estas paredes com elevada massa térmica estavam localizadas na face externa das paredes exteriores e sem isolamento contra as melhores práticas sugeridas na utilização de massa térmica.

Deng e al. (2011) apresentam dois projetos de edifícios residenciais unifamiliares. Um para um clima quente e seco (Madrid) e outro para um clima quente e úmido (Xangai). Os autores descrevem os sistemas dos dois edifícios de energia zero.

O sistema geração fotovoltaica de Madri era composto por três painéis. Dois painéis policristalinos nas fachadas leste e oeste perfazendo 66 m<sup>2</sup>. Um terceiro painel misto fotovoltaico térmico (FV/T) com células monocristalinas com área de 33 m<sup>2</sup>.

Ambos os edifícios utilizavam sistemas solares térmicos para auxiliar os sistemas de climatização. No caso de Madrid um sistema radiante era responsável pelo aquecimento cujo calor era fornecido por uma bomba de calor reversível elétrica de 2,4 kW de potência. No verão, um sistema radiante de arrefecimento utilizando o sistema misto fotovoltaico térmico, regenera os Materiais de Mudança de Fase integrados no forro do edifício.

No caso de edifício de Xangai uma bomba de calor híbrida arrefecida a ar para auxiliar a operação do sistema HVAC elétrico. A bomba integra um chiller Libr de absorção e uma bomba de calor de CO<sub>2</sub>.

O edifício de Madrid foi montado nessa cidade por um curto espaço de tempo: era o edifício que concorreu ao *Solar Decathlon Europe 2010* da Universidade de Stuttgart. O edifício de Xangai é um projeto de um edifício de pesquisa a ser construído no Campus da universidade Jiao Tong.

Por esse motivo o desempenho dos edifícios é avaliado através de simulações. Nas simulações foram avaliados o balanço energético e as condições de conforto térmico no interior dos edifícios. O software de simulação utilizado foi o TRANSYS com arquivos climáticos retirados do Metanorm utilizando *timesteps* de seis minutos.

Segundo os autores os edifícios teriam sucesso na manutenção das temperaturas dentro de faixas de conforto. Todavia, mas não seriam capazes de manter os valores de umidade relativa respectivos para garantir condições de conforto.

Ferrante e Cascella (2011) simularam a implantação de edifício de energia zero para a cidade de Tricase no sul da Itália. Propondo um conjunto de apartamentos geminados horizontais concluíram que seria relativamente fácil atingir a marca edifício de energia zero naquele contexto. Os autores, no entanto, enfatizam que a aplicação somente de tecnologia não é suficiente. É necessário utilizar sistemas passivos, tradicionais e modernos para depois incorporar as tecnologias de geração.

Miller e Buys (2010) apresentam uma análise pós-ocupação de uma residência unifamiliar para duas pessoas no estado de Queensland, na Austrália. Localizada no paralelo 28 o edifício foi monitorado de junho de 2009 a maio de 2010. O edifício conta com um sistema de geração fotovoltaica com 1,7 kWp de potência. A instalação de suporte do sistema é móvel permitindo ajustar sazonalmente a inclinação de 18° a 40° para maximizar desempenho. A geração média anual é de 7,59 kWh por dia.

A Figura 19 apresenta os consumos energéticos apurados.

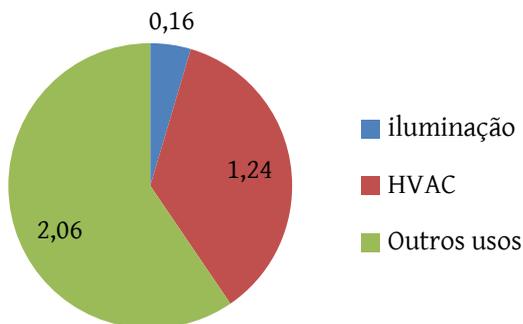


Figura 19: Usos finais de eletricidade médios diários do edifício de energia zero em Queensland.

Fonte: Miller e Buys (2010)

Um sistema solar térmico atende um consumo diário de água de 63 litros através de coletores solares planos montados a um ângulo de 35° para maximizar o desempenho no inverno. Este sistema foi capaz de atender 99% do consumo anual de água. Um sistema de aquecimento de água incluía um aquecedor a gás de backup. A alta fração solar foi atingida através do dimensionamento do sistema e da otimização do ângulo dos coletores para o desempenho para inverno.

É necessário notar que a dimensão do sistema geração fotovoltaica é muito inferior da prática revista na bibliografia. O edifício não é totalmente elétrico. Mas mesmo assim os autores afirmam que a geração fotovoltaica ultrapassou o consumo elétrico somado ao consumo energético do gás.

O consumo médio diário anual foi de 3,46 kWh e o consumo de gás foi de 5,4 MJ, resultando num consumo diário equivalente de 4,96 kWh (148 kWh por mês)

Estes valores são um quarto do consumo médio residencial no estado de Queensland. É de notar que um consumo médio de água de 63 litros para duas pessoas por dia parece extremamente reduzido para a realidade brasileira. No entanto, o clima de Brisbane, Queensland é comparável a climas subtropicais brasileiros e foi possível atingir um consumo mensal de energia inferior a 200 kWh.

## 2.10 EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO NO CONTEXTO TROPICAL

### 2.10.1 Singapura

A revisão encontrou dois edifícios de energia zero tropicais construídos, com dados sobre estratégias de estratégias de condicionamento: o edifício ZER em Singapura, um clima equatorial (BUILDING & CONSTRUCTION AUTHORITY, 2013) e edifício educacional universitário Enerpos, na Ilha da Reunião, um território insular francês localizado no hemisfério sul (FRANCO e al., 2011; GARDE e al., 2012; LENOIR e al., 2011).

O edifício ZER consiste em um retrofit de um edifício de escritório preexistente. O retrofit otimizou o envelope e o substituiu o sistema de climatização. Ao envelope foi acrescentado sombreamento das áreas transparentes e introduzidas prateleiras de luz para otimização de iluminação natural. O sistema de climatização foi substituído utilizando um sistema que apresenta dutos separados para ar vindo do exterior e refrigerado e ar reciclado. O ar exterior é fornecido somente para as divisões que apresentam ocupação, enquanto o ar reciclado é utilizado nas divisões não ocupadas.

A Figura 20 ilustra o funcionamento de um sistema normal de ar condicionado e do sistema utilizado no ZER.

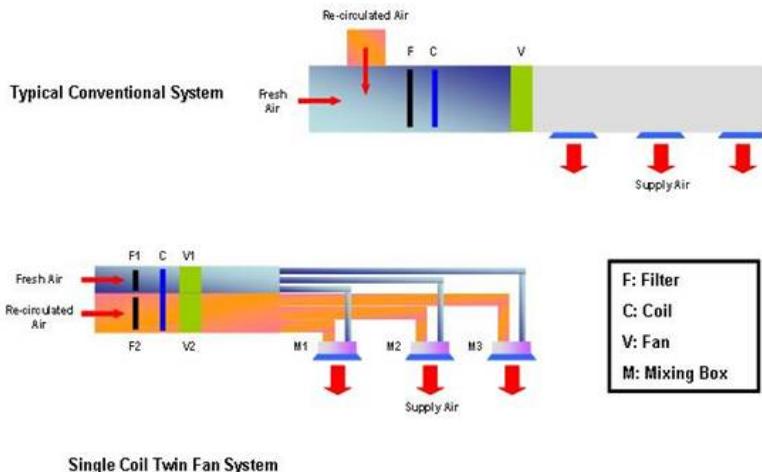


Figura 20: Comparação de funcionamento de sistema de condicionamento normal com sistema utilizado no ZER.

Fonte: Building & Construction Authority (2013).

O ar é fornecido por difusores instalados no piso. Dessa forma, o ar frio não se mistura com o ar quente presente na sala e vai forçando o mesmo em direção ao teto onde estão localizadas as entradas para captação do ar. Esta estratégia permite um menor consumo em climatização decorrente de não misturar o ar quente com frio. A Figura 21 ilustra a localização dos difusores no piso.

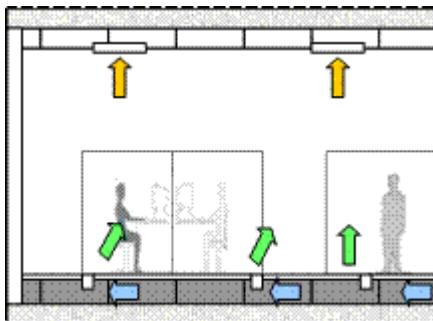


Figura 21: Localização de difusores de ar no piso do edifício ZER.

Fonte: Building & Construction Authority (2013).

Adicionalmente, cada posto de trabalho apresenta uma entrada de ar refrigerado com velocidade variável controlada pelo usuário. A proximidade das entradas dos postos de trabalho dos usuários garante uma maior qualidade de ar, que permite reduzir a taxa de renovação de ar como um todo, resultando na redução do consumo energético. O uso das entradas de ar nos postos de trabalho permite utilizar uma temperatura de controle mais elevada (26 °C), contribuindo para a redução do consumo energético de climatização.

A Figura 22 ilustra o funcionamento das entradas de ar nos postos de trabalhos utilizados no edifício ZER.



Figura 22: Ilustração de funcionamento das entradas de ar nos postos de trabalho utilizadas no edifício ZER.

Fonte: Building & Construction Authority (2013):

### 2.10.2 Enerpos

Enerpos (Energia positiva) foi um projeto de pesquisa francês com o objetivo de pesquisar como projetar edifícios de energia positiva para os territórios em regiões ultramarinas tropicais francesas: as ilhas de Martinique e Guadeloupe no Caribe, A Ilha de Reunião a 400 km a leste de Madagascar e a Guiana Francesa, a norte do Brasil. Nessas regiões francesas ultramarinas, o consumo energético cresce 4% ano com geração majoritariamente termoelétrica. Tal tendência de crescimento de energia não é ecológica e economicamente sustentável segundo Garde e al. (2007)

Adicionalmente, os edifícios de escritório nestas regiões ignoram princípios bioclimáticos, resultando em consumos energéticos elevados com uma média de 160 kWh/ano/m<sup>2</sup> sendo a climatização artificial responsável por 50% do consumo (GARDE e al., 2007). Saliente-se que Bravo e González (2013) reportam um consumo energético de 75% para climatização artificial em edifícios residenciais para cidade de Maracaibo na Venezuela..

Como resultado do projeto Enerpos, um edifício foi projetado, construído e monitorizado na ilha de Reunião (FRANCO e al., 2011;

GARDE e al., 2011; 2012; LENOIR e al., 2011). O edifício pertence à universidade de Reunião, tem dois pisos com uma área total de 625 m<sup>2</sup>. O edifício contém uma zona administrativa com sete escritórios e uma sala de reuniões, duas salas com computadores e cinco salas de aula.

A Figura 23 apresenta uma fotografia da fachada do edifício.



Figura 23: Edifício Enerpos na ilha de Reunião.

Fonte: Garde e al. (2011).

O edifício foi projetado para maximizar o período de operação de técnicas passivas como ventilação e iluminação natural. Adicionalmente, quando a operação passiva não é viável, o uso de sistema de condicionamento de ar é retardado através do uso de ventiladores de teto. O objetivo era atingir um consumo energético anual menor que 55 kWh/m<sup>2</sup> segundo Garde e al. (2007).

A Figura 24 ilustra como tal objetivo foi alcançado no edifício construído, especificando os meses de uso de cada sistema de climatização.

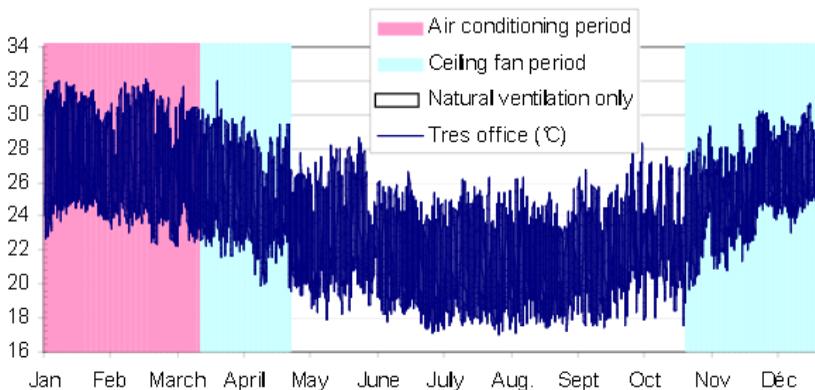


Figura 24: Ilustração de períodos de atuação dos sistemas de climatização.

Fonte: Garde e al. (2012).

Para atingir esse objetivo, o projeto maximiza a ventilação cruzada com um mínimo de 30% de porosidade nas aberturas, incluindo portas internas, utilização de sombreamento, equipamentos eficientes, densidade de iluminação artificial menor a  $7 \text{ W/m}^2$ , monitorização do consumo energético por usos finais e banda de vegetação com 4 m de largura rodeando o edifício de acordo com Lenoir e al. (2011).

A Figura 25 ilustra algumas das estratégias utilizadas no projeto do Enerpos.



Figura 25: Ilustração de estratégias utilizadas no Enerpos. Fonte: Lenoir e al. (2011).

Após a construção foi realizada uma avaliação pós-ocupação sobre as condições de conforto térmico dentro do edifício. No total 1749 questionários foram preenchidos por 594 alunos e seus professores durante 108 sessões de duas horas cada. A avaliação aconteceu durante os meses de outubro a abril (estação quente) nos anos de 2009 e 2010 Lenoir e al. (2011).

Os usuários reportaram condições de conforto térmico quando a temperatura é inferior a 30 C com velocidade do ar de 1 m/s, sendo possível assim atingir conforto térmico durante os dias mais quentes do ano, nas salas de aula e nos escritórios. No entanto, o calor gerado por os computadores obriga ao uso de ar condicionado nas salas onde os mesmos estão instalados, durante as seis semanas mais quentes do ano. Assim, um edifício de energia zero nos trópicos pode atingir conforto térmico na maior das horas do ano, evitando o uso do condicionamento de ar através do uso de ventilação natural e sistema de climatização de baixo consumo energético como ventiladores de teto conclui Garde e al. (2011). O controle da abertura das janelas e do acionamento dos ventiladores de teto era feito por os usuários. Esta estratégia era deliberada, visto que o controle da operação dos sistemas de climatização aumenta a percepção de conforto térmico dos usuários de acordo com Garde e al. (2012).

## 2.11 POLÍTICAS ENERGÉTICAS, EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO E EDIFÍCIOS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS NA REDE NO BRASIL

Ao contrário da União Europeia e Estados Unidos da América, o Brasil não tem uma política para a promoção ativa de edifícios de energia zero, nem se antevê tal política em um futuro próximo.

Até 2012, a legislação não permitia uma fácil interligação à rede pública elétrica. Faltava um marco regulatório efetivo com políticas de incentivo para a promoção dos sistemas fotovoltaicos conectados na rede segundo Varela e al. (2010). Dentro do programa Luz para Todos, Jannuzzi e al. (2010) constataram que as concessionárias estão instalando poucos sistemas fotovoltaicos. Neste caso, existe um marco regulatório e financiamento para Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica através de Fontes Intermitentes. Um dos problemas apontados para esta situação foram as incertezas dos consumidores em relação à modalidade dos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica através de Fontes Intermitentes.

A resolução normativa Nº 482 da ANEEL (2012) criou, pela primeira vez no Brasil, uma base legal e uma regulamentação ampla que prevê e permite sistemas residenciais interligados à rede elétrica pública.

Segundo Rüther e al. (2005) o Brasil tem abundância de sol, com um sistema centralizado de geração de energia, baseado em um grande número usinas hidroelétricas, frequentemente distantes dos centros de consumo. Esta situação provoca perdas extensas e onerosas em transmissão e distribuição de energia. O consumo energético está disperso por um largo número de centros urbanos onde residem 80% da população. Os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de eletricidade. Os picos de consumo estão associados às demandas dos sistemas de condicionamento de ar no verão. Quando estes picos ocorrem, está presente, simultaneamente, uma elevada disponibilidade de irradiação solar. Verifica-se, portanto, uma complementaridade entre os picos de carga e os picos de geração fotovoltaica no Brasil.

Do ponto de vista econômico, Rüther e Zilles (2011) afirmam que a paridade de preços da eletricidade gerada por sistemas fotovoltaicos com eletricidade gerada por outras fontes será alcançada no Brasil na presente década. Os autores defendem a premência de ações governamentais nesta área para acumular a experiência necessária

que permita aproveitar a paridade do preço da energia gerada por sistemas fotovoltaicos.

A redução das tarifas elétricas no final de 2012 resultou no adiamento da paridade do preço. No entanto, a subida inevitável dos preços dos combustíveis fósseis não altera a tendência de alcançar a paridade de preços.

Outro benefício econômico dos edifícios de energia zero seria o auxílio na redução de furtos de energia. Segundo Lima (2012) a rede inteligente (*smart grid*) pode auxiliar na redução de furtos de energia. A rede inteligente é uma condição necessária para a implantação de edifício de energia zero.

A resolução N°482 criou o sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*) no Brasil. Energia exportada por um micro produtor para a rede cria um crédito para ser redimido na importação de energia da rede elétrica pública. Esta redação permite evitar a incidência de impostos sobre a troca de energia e reduz o custo de interligação à rede.

No entanto, produção excedente de energia não pode ser vendida. Os créditos de energia têm uma carência de trinta e seis meses. Esta política tenderá a incentivar edifícios de energia zero, mas não edifícios de energia positiva<sup>11</sup>. Dependendo da tarifa elétrica, a venda de energia poderia ser um incentivo extra para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Os edifícios de energia positiva poderiam ser uma forma de aumentar a geração fotovoltaica no Brasil, financiada por privados.

Em abril de 2013, a isenção de impostos da energia gerada foi revogada. Tal fato cria uma situação anômala onde a energia fornecida à rede elétrica é mais cara que a importada. No entanto, segundo Montenegro (2013) uma reversão desta medida está sendo considerada, reinstituindo a isenção de impostos para a energia gerada por sistemas fotovoltaicos de micro-produtores.

Pesquisa acadêmica no Brasil sobre edifício de energia zero ainda é escassa. A primeira referência encontrada na bibliografia referente ao tema no Brasil ocorre em 2002 onde Cervantes; Jannuzzi (2002) introduzem o tema de sistemas de compensação de energia

---

<sup>11</sup> Existe uma possibilidade de troca de energia com terceiros não prevista nem proibida especificamente na resolução normativa: utilizar energia excedente no carregamento de baterias de veículos elétricos mediante compensação financeira acordada entre privados.

elétrica como forma de promover a autossuficiência energética. Pacheco e Lamberts (2008) analisaram as definições de edifício de energia zero e as políticas de promoção de edifício de energia zero, abordado a realidade internacional.

Lima (2012) apresentou a primeira dissertação encontrada na bibliografia sobre o tema no Brasil. A dissertação propõe uma metodologia para projeto de edifícios de energia zero. A metodologia visa auxiliar arquiteto e engenheiros no projeto de edifícios de energia zero.

A metodologia analisa o consumo do edifício e o seu potencial de geração energético. A metodologia inclui a avaliação dos resultados do consumo e geração energética para constatar se a marca de energia zero será atingida. A metodologia incluiu a proposição de ferramentas para auxílio à decisão entre as opções de diferentes tecnologias de geração. Os parâmetros de auxílio à decisão são o custo da eletricidade gerada e o tempo de retorno da energia. A metodologia utiliza a definição local de edifício de energia zero para análise.

A dissertação apresenta a aplicação da metodologia ao projeto de um laboratório a construir na Unicamp. São realizadas análises para um sistema eólico e três alternativas de sistemas fotovoltaicos. As três alternativas de sistemas fotovoltaicos são silício mono cristalino, poli cristalino e filme fino de disseleneto de cobre, gálio e índio. Os resultados foram analisados em termos anuais e sazonais. É apresentada uma análise econômica de viabilidade baseada em cotações de empresas para o custo de cada um dos sistemas.

Dávi (2013) apresenta uma dissertação analisando o desempenho da Eko House em Madri na competição *Solar Decathlon Europe*. A dissertação descreve os procedimentos utilizados para a medição do desempenho do sistema fotovoltaico da Eko House. A dissertação analisa as interações entre sistema fotovoltaico, carga elétrica e rede elétrica monitoradas durante o período da competição em Madri.

Dávi (2013) também compara e analisa as relações entre geração e consumo da Eko House com quatro dos edifícios de equipes concorrentes. A análise enfoca o período da competição, comparando diversos parâmetros relacionados à geração fotovoltaica e relação geração consumo. Finalmente, a dissertação realiza análises econômicas de viabilidade do sistema fotovoltaico da Eko House. Os resultados da análise apontam um tempo de retorno do investimento de 13 anos com uma taxa interna de retorno de 10% ano. Este resultado

pressupõe o sistema operando em São Paulo, financiando 50% do total do investimento.

Invidiata (2013) estudou adaptação da Eko House às diferentes regiões bioclimáticas brasileiras. Em primeiro lugar, o projeto original da Eko House foi avaliado para cada uma das cidades representantes das diferentes regiões bioclimáticas do Brasil. A avaliação foi feita através do método prescritivo do Regulamento Técnico da Qualidade Residencial (RTQ-R), do método de simulação do RTQ-R e de balanço energético. Seguidamente, o autor adaptou o projeto da Eko House a cada uma das regiões bioclimáticas brasileiras. Os resultados mostraram melhores desempenhos para das versões adaptadas para todas as regiões, acontecendo os melhores desempenhos para as regiões mais quentes com redução de até 20% no consumo energético comparadas com o projeto original projetado para Madri.

Montenegro (2013) avaliou os efeitos da viabilidade econômica da geração fotovoltaica à luz da resolução N°482 da ANEEL (2012). Analisando cenários que incluíam a redução de tarifas elétricas em 2012 e a revogação de impostos sobre a energia gerada fornecida à rede. Montenegro (2013) conclui que a revogação do imposto sobre a energia gerada que impede a paridade no país como um todo. No entanto, a reinstauração da isenção de impostos sobre energia gerada, resultaria em paridade de preço para algumas zonas do país.

Dentro do contexto de edifícios de energia zero residenciais unifamiliares, existe o projeto casa eficiente em Florianópolis (LAMBERTS e al., 2010). A casa eficiente é um projeto de pesquisa que projetou, construiu e monitorou o desempenho de uma edificação residencial unifamiliar localizada em Florianópolis, no terreno da sede da Eletrosul. A casa eficiente resultou de um convênio entre a Eletrobrás, Eletrosul e a Universidade Federal de Santa Catarina. Através do programa PROCEL, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações projetou e orientou a construção do edifício como vitrine de tecnologias de eficiência energética, conforto ambiental, geração solar de energia e uso racional de água para residências.

A casa eficiente dispõe de um sistema fotovoltaico e dois sistemas solares térmicos. O sistema fotovoltaico é interligado à rede pública elétrica. O sistema original tinha uma capacidade de 2,25 kWp. O sistema era constituído por 30 módulos silício policristalino (p-Si) de 75 Wp cada, tendo entrado em operação em 28 de julho de 2006. O sistema fotovoltaico está orientado a norte com uma inclinação igual à latitude de Florianópolis (27° Sul).

O sistema solar térmico apresenta dois sistemas de coletores solares diferentes. Os dois sistemas possuem configurações idênticas servindo objetivos distintos. Um dos sistemas é utilizado para aquecimento de água doméstica. O outro sistema é utilizado para aquecimento do ar no interior da residência. Cada um dos dois sistemas é composto por dois coletores solares planos de 1,4 m<sup>2</sup> com um reservatório térmico horizontal de 200 litros. Ambos os reservatórios dispõem de uma resistência elétrica auxiliar de 1500 W, funcionando por circulação forçada.

Dentro do projeto de pesquisa da casa eficiente, foi monitorado o desempenho da geração dos sistemas solares (fotovoltaico e térmico). Foram igualmente monitorados dados de desempenho térmico e de consumo dos equipamentos. No entanto, a casa eficiente nunca foi habitada. Foi criado um padrão de uso e os equipamentos ligados de acordo. O consumo individual de cada equipamento nessas condições foi medido de acordo com o padrão de uso definido. Os resultados das medições permitem definir consumos mensais e anual.

Este procedimento tem algumas limitações. Em primeiro lugar, parte de um padrão de uso artificialmente criado e regulamente repetido. Em segundo lugar, o uso dos equipamentos nestas condições também apresenta limitações sobre a representatividade dos consumos medidos. Por exemplo, o consumo de uma geladeira depende vários parâmetros como quão cheio o interior da mesma e quantas vezes a porta é aberta.

No entanto, estes consumos servem de base para testar os efeitos da variação dos padrões de uso baseados em medições de consumo de equipamentos reais dentro da casa eficiente. Baseando nestes dados de consumo, foram feitas simulações de cinco perfis de consumo energético. Um perfil simulando uma família com hábitos de maior consumo e o outro perfil simulando uma família com consumo consciente. Foi calculado o consumo de dois padrões de uso, utilizando um conjunto de equipamentos eficiente e outro conjunto de equipamentos ineficientes. O conjunto dos equipamentos eficientes é formado por a soma de todos os equipamentos da casa eficientes, acrescido de aparelhos de ar condicionado nos quartos.

Multiplicando dois padrões de uso com dois conjuntos de equipamento obtiveram-se quatro consumos distintos. Estes quatro perfis incluem um sistema de ar condicionado que a casa eficiente não possui. Dessa forma foi criado um quinto perfil que utiliza o padrão de

uso da família com consumo consciente e excluindo o ar condicionado do conjunto dos equipamentos eficientes.

Analisando os dados de geração fotovoltaica da casa eficiente com os perfis de consumo, nota-se que dois dos perfis atingem a marca de energia zero como pode ser visto na Figura 26.

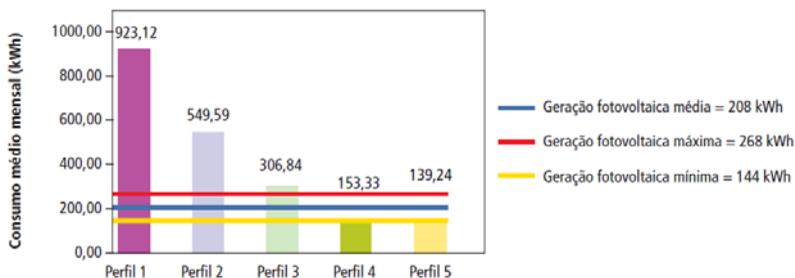


Figura 26: Balanços energéticos mensais da casa eficiente para diferentes perfis de consumo. Fonte: Lamberts e al. (2010)

## 2.12 CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO

A atual matriz energética brasileira apresenta-se quase igualmente dividida entre fontes renováveis e não renováveis<sup>12</sup>. As fontes não renováveis de energia respondem por 54% da geração primária de energia. Os restantes 46% advêm de fontes renováveis, de acordo com os dados mais recentes referindo-se ao ano base de 2012 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013). A Figura 16 mostra a relação entre fontes de energia não renováveis e renováveis desde 1970 até o ano de 2012. A parcela de fontes renováveis tem vindo a decrescer. No entanto, o valor de 46% para a geração renovável ainda é bastante superior à média mundial de 13% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013).

<sup>12</sup> Esta sessão é adaptada de Pacheco e Lamberts (2013)

A Figura 27 apresenta as parcelas de fontes renováveis e não renováveis da matriz energética brasileira de 1970 a 2012.

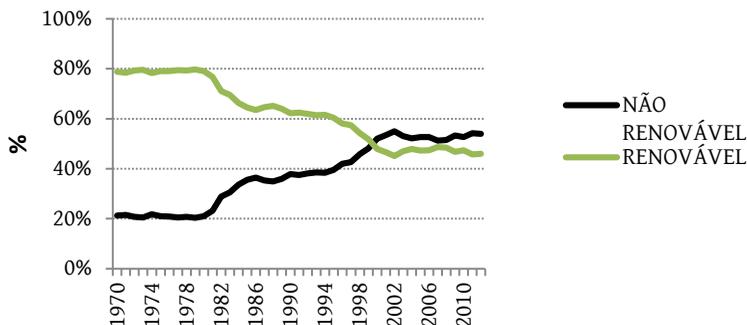


Figura 27: Geração de energia primária brasileira de fontes renováveis e não renováveis de 1970 a 2012.

Fonte: autor, baseado em dados da Empresa de Pesquisa Energética (2013).

A Figura 28 apresenta os valores percentuais geração diferentes fontes renováveis na matriz energética. O petróleo gera 42% da energia primária, sendo a maior fonte de energia, gerando quase tanta energia quanto todas as fontes renováveis somadas. O petróleo é responsável por a maior parte da geração não renovável, com o gás natural sendo a segunda maior fonte primária de energia, respondendo por 10% da geração. A geração nuclear responde por menos de 2% da geração primária.

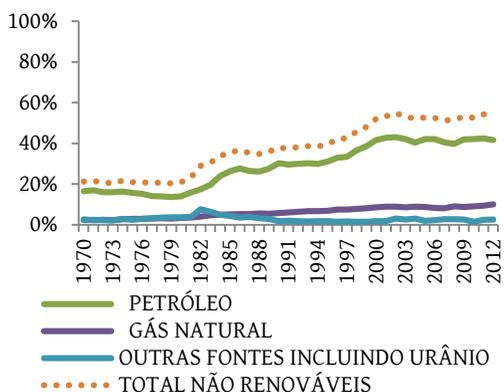


Figura 28: Participação das fontes não renováveis na produção de energia primária na matriz energética brasileira. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2013).

Ao contrário das fontes não renováveis, as fontes renováveis apresentam valores mais próximos como ilustrado na Figura 29. Os produtos de cana de açúcar, geração hidráulica e lenha são responsáveis por 18%, 14% e 10% da geração primária de energia. Note-se que o elevado valor atribuído à lenha, que parece suspeito. Todas as outras fontes renováveis de energia juntas são responsáveis por 5% da geração global.

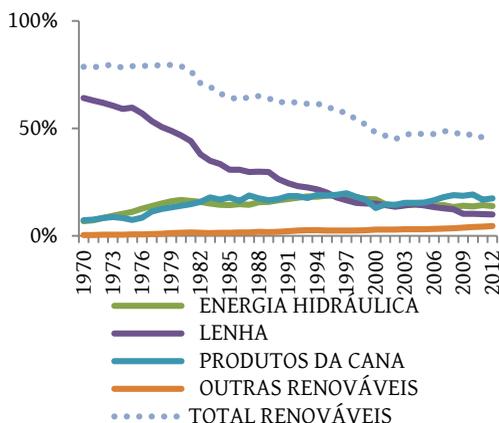


Figura 29: Participação das fontes renováveis na produção de energia primária na matriz energética brasileira. Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2013).

De 1970 a 2012 a geração de energia primária no Brasil cresceu mais de 5 vezes de  $49627 \cdot 10^3$  tep (tonelada equivalente de petróleo) para  $257299 \cdot 10^3$  tep, de acordo com os últimos dados disponíveis. A evolução da matriz energética durante este período apresenta a parcela gerada por fontes renováveis decrescer de 79% em 1970 para 46% em 2012 com um máximo de 80% em 1979. Mudanças em quatro fontes de energia (petróleo, geração hidráulica, produtos de cana do açúcar e lenha) provocaram estas variações. Em primeiro lugar, o crescimento da importância das fontes não renováveis segue diretamente o crescimento participação do petróleo na matriz energética brasileira. Simultaneamente, com o crescimento da participação do petróleo, a parcela de energia primária fornecida por a lenha reduziu-se. Note-se que os dados referentes ao consumo de lenha são notoriamente difíceis de coletar e estão possivelmente sobre estimados. Esta redução aconteceu em termos relativos (de 64% em

1970 para 10% em 2012) como em termos absolutos (de 32.852 10<sup>3</sup>tep para 25.735 10<sup>3</sup>tep). O máximo da participação de fontes renováveis na matriz energética coincidiu com o aumento da geração hidráulica e produtos de cana de açúcar no final da década de 1970. Nessa época a barragem de Itaipu e o programa PROALCOOL começaram a contribuir significativamente para a matriz energética. Na década de 2000, a geração hidroelétrica nivela e o programa PROALCOOL perde força, fazendo as fontes não renováveis ultrapassar as renováveis pela primeira vez. Adicionalmente, os contratos nos leilões de eletricidade passam a ser decididos somente baseados no menor preço. Este fato levou a sucessivos contratos de energia ganhos por termoelétricas com carvão como fonte de energia. No final da década de 2000, verifica-se um novo interesse em biocombustíveis que, somado à introdução da tecnologia de motores flex, instigou um novo crescimento de consumo energético à base de cana de açúcar. Este novo interesse não foi suficiente para que as fontes renováveis de energia voltassem a ultrapassar a não renováveis na matriz energética. Saliente-se, no entanto, que no que tange à geração elétrica 84 % é de fonte renováveis devido à geração hidroelétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013).

### **2.12.1 Setor residencial na matriz energética brasileira.**

O consumo energético do setor residencial no Brasil manteve-se relativamente estável de 1970 a 2012, em termos absolutos, com um valor médio de 20.525 10<sup>3</sup> tep (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013) com mínimo de 17.84610<sup>3</sup> tep em 1993 e máximo 23.761 10<sup>3</sup> tep em 2012. Durante este período, a população cresceu de 92,7 milhões para 190,7 milhões, enquanto a renda per capita subiu de 1706 USD para mais de 10.000 USD. Uma vez que o consumo global de energia no Brasil cresceu de 135.147 10<sup>3</sup> tep em 1970 para 257.299 10<sup>3</sup> tep em 2012 a parcela do consumo residencial baixou de 36% para 9% neste período.

Neste período, a parcela relativa das diferentes fontes de energia alterou-se significativamente. A lenha deixou de ser a principal fonte de energia, decrescendo a sua participação de 86% em 1970 para 27% em 2012.

Durante esse período, a eletricidade e o gás natural liquefeito, tornaram duas fontes importantes de energia. A eletricidade tornou-se a principal fonte de energia do setor residencial, aumentando a sua participação de 3% (em 1970) para 43% (em 2012) como ilustrado na Figura 30.

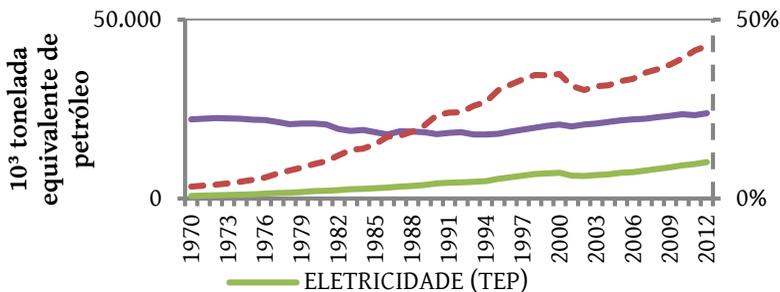


Figura 30: Parcela da eletricidade no consumo energético residencial brasileiro de 1970 a 2012.

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2013).

O gás natural liquefeito torna-se a terceira maior fonte de energia do setor residencial, de aumentando sua participação de 6% (em 1970) para 27% em (2009) segundo Ministério de Minas e Energia (2011). A eletricidade e o gás natural liquefeito são fontes de energia com uma maior usabilidade e, conseqüentemente, provocam um aumento de eficiência dos serviços de energia. O aumento de eficiência dos serviços de energia decorrente da troca de fonte de energia explica como o consumo do setor residencial de energia brasileiro se manteve relativamente estável perante o aumento de população e renda per capita de 1970 a 2009 (HENRIQUES e KANDER, 2010).

### 2.12.2 Usos finais de energia nas residências brasileiras.

Dados sobre de usos finais de energia no setor residencial no Brasil são escassos. Os dados disponíveis originam de quatro fontes. Em primeiro lugar, de um artigo de Jannuzzi e Schipper (1991) com dados de algumas cidades dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, coletados entre 1985 e 1986. Os restantes conjuntos de dados foram obtidos de inquéritos patrocinados por a ELETROBRÁS e programa PROCEL. Estes dados dizem respeito a três períodos, 1989 analisado por Almeida e al. (2001), de 1997 a 1998 analisados por Ghisi e al. (2007) e finalmente dados de 2005, analisados nesta seção. É importante salientar que estes dados foram obtidos através de inquéritos e não de

medições concretas de usos finais. Dessa forma, estes dados levantam dúvidas sobre a sua exatidão.

A Tabela 9 sintetiza os dados apurados.

Tabela 9: Síntese dos estudos de usos finais de energia residenciais brasileiros.

| Fonte   | Jannuzzi e Schipper (1991) | Almeida e al. (2001) | Ghisi e al. (2007) | PROCEL (2007) |
|---|----------------------------|----------------------|--------------------|---------------|
| Ano base                                      | 1985/1986                  | 1989                 | 1997/1998          | 2005          |
| Uso final                                     | [%]                        | [%]                  | [%]                | [%]           |
| Aquecimento de água                           | 24                         | 21                   | 20                 | 24            |
| Geladeira                                     | 33                         | 34                   | 33                 | 22            |
| Freezer                                       | 4                          |                      | 9                  | 5             |
| Ar condicionado                               | 7                          | 3                    | 10                 | 20            |
| Iluminação                                    | 12                         | 12                   | 11                 | 14            |
| Eleto-domésticos e outros aparelhos elétricos | 20                         | 30                   | 17                 | 15            |

Fonte: (JANNUZZI e SCHIPPER, 1991; ALMEIDA e al, 2001; GHISI e al., 2007; PROCEL, 2007).

De acordo com o PROCEL (2007), dois terços das residências brasileiras consomem menos de 200 kWh de eletricidade por mês. Ghisi e al. (2007), baseado em uma pesquisa englobando doze estados brasileiros, representando 31% da área do país e 70% da população, estimou que o consumo energético conjunto da geladeira e freezer representam 38% a 49% do consumo energético elétrico nas residências brasileiras. Este consumo energético permanece constante ao longo do ano. Ao contrário, os seguintes usos finais com maior consumo energético (ar condicionado e chuveiro elétrico) apresentam uma maior variação de valores dependendo das condições climáticas.

A terceira pesquisa de consumo energético de usos finais ELETROBRAS/PROCEL de 2005 inclui um número maior de estados quando comparada com a segunda pesquisa, analisada por Ghisi e al. (2007). A pesquisa de 2005 inclui um número maior de estados (16 ao invés de 12) com um número menor de entrevistas (9.847 comparadas com 16.662 revistas por Ghisi e al. (2007)). Segue-se uma análise dos

resultados da terceira pesquisa de usos finais ELETROBRAS/PROCEL de 2005.

### **2.12.3 Aquecimento doméstico de água**

Os sistemas de aquecimento de água estão presentes em 81% dos domicílios brasileiros. A eletricidade é a fonte de energia para 74% dos sistemas de aquecimento de água. Entre os sistemas de aquecimento de água elétricos, virtualmente todos usam chuveiros elétricos, resultando em um coeficiente de desempenho de valor 1. Os restantes sistemas de aquecimento de água de fonte de energia não elétrica 6% usam gás como fonte e só 0,4% dos domicílios usam coletores solares de acordo com o PROCEL (2007). Dessa forma, o aquecimento de água é parte significativa do consumo energético elétrico residencial brasileiro.

Os dados não mostram uma tendência consistente no consumo energético elétrico para aquecimento de água. Ghisi e al. (2007) mostraram uma queda no consumo energético elétrico para aquecimento de água de banho de 23% em Jannuzzi e Schipper (1991) para 21% em Almeida e al. (2001) para finalmente 20% em Ghisi e al. (2007). No entanto, de acordo com a pesquisa de 2005, o aquecimento de água era responsável por 24% do consumo energético elétrico total.

### **2.12.4 Geladeira e freezer**

Geladeiras estão presentes em quase todas as residências no Brasil. Mesmo para menor faixa de consumo energético mensal (0-200 kWh) somente 5 % das residências não possuíam uma geladeira (PROCEL, 2007). Estes dados referem-se ao ano de 2005. Desde então, a posse de geladeiras nos domicílios brasileiros provavelmente aumentou. Segundo Achão e Schaeffer (2009) a ação conjunta dos programas Luz para Todos e bolsa família, iniciado em 2004, induziu um aumento na compra de geladeiras. Os dados não mostram uma tendência definida. Jannuzzi e Schipper (1991), Almeida e al. (2001) e Ghisi e al. (2007), apontam a geladeira como responsável por sensivelmente 33% do consumo energético mensal doméstico, enquanto PROCEL (2007) aponta o valor de 22%.

### 2.12.5 Condicionamento de ar

A posse de sistemas de condicionamento de ar ocorre em 10% dos domicílios brasileiros. A posse de sistemas de condicionamento de ar varia substancialmente entre regiões e não parece estar ligada à renda média. A região com a maior percentual de domicílios com de condicionamento de ar, a região norte com 17% de posse, é também aquela com a menor renda média do país. A segunda região com maior posse, a região sul com 16%, apresenta a segunda maior renda per capita. Finalmente, a menor posse de condicionamento de ar (7%) ocorre na região sudeste, a região com maior renda média per capita PROCEL (2007).

A maior posse de condicionamento de ar na região norte parece fazer sentido, dada a sua localização na bacia amazônica, em latitudes tropicais e equatoriais, com clima quente e úmido. A posse elevada na região sul, pode parecer mais difícil de explicar dada a localização majoritariamente subtropical. No entanto, pode ser motivada por desconforto térmico por frio assim como por calor. Segundo PROCEL (2007), os sistemas de condicionamento de ar na região sul apresentam frequentemente ciclo reverso, permitindo aquecimento assim como refrigeração. Dessa forma, seriam utilizados no inverno. Adicionalmente, a região sul no verão atinge valores elevados de temperatura, atingindo frequentemente valores máximos dentro do contexto nacional.

A parcela do consumo energético doméstico mensal decorrente equipamentos elétricos e eletrônicos equipamentos parece estar decrescendo. A parcela decresceu de 30% em 1989 segundo Almeida e al. (2001), para 17% em 1997/1998 (GHISI e al., 2007) para 15% em 2005 (PROCEL, 2007). Os dados do estudo de Jannuzzi e Schipper (1991), baseados em dados de 1985/1986, no entanto não se enquadram nesta tendência. Entre os vários equipamentos elétricos e eletrônicos o mais frequente é a televisão, presente em 97% das residências brasileiras com uma posse média de 1,41 aparelhos por domicílio segundo PROCEL (2007).

### 2.12.6 Iluminação

Em relação à iluminação, o consumo energético parece ter-se mantido constante em todos os estudos, variando entre 11% e 14%. A maior diferença de entre os consumos energéticos apontados para o

sistema de iluminação ocorre entre os dois os dois estudos mais recentes do PROCEL. Assim, Ghisi e al. (2007) apresentam um valor de 11% e PROCEL (2007) apresenta um valor de 14%. Esta diferença é possivelmente resultado das imprecisões decorrentes do processo de inquérito. Este fato é reforçado por a indicação de uma progressão para tecnologias de iluminação mais eficientes. Para o ano base de 1985/86, de acordo com Jannuzzi e Schipper (1991), as lâmpadas compactas fluorescentes estavam somente presentes em residências com maior renda, circunscritas a banheiros e cozinhas. Em 2005, segundo PROCEL (2007), as residências possuíam, em média, o mesmo número de lâmpadas incandescentes e compactas fluorescentes, sendo que 62% das residências apresentavam no mínimo uma lâmpada compacta fluorescente. Residências com maior consumo energético mensal médio apresentaram maior incidência de lâmpadas compactas fluorescentes.

### 2.13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão mostra vontade política da União Europeia e Estados Unidos de promover os edifícios de energia zero. Nos climas frios, a busca do balanço energético zero requer a redução consumo energético de climatização. Nessa busca, nos climas frios, o modelo superisolado para a climatização foi adotado. Existem iniciativas visando à adoção modelo superisolado para climas quentes, incluído o Brasil.

O sistema superisolado foi concebido para otimizar o desempenho de sistemas de climatização artificiais de aquecimento. Dadas as condições climáticas vigentes nos climas frios (Norte e centro da Europa e norte América) os sistemas de aquecimento operam ininterruptamente a maior parte do ano. O modelo superisolado pressupõe operação contínua 24 horas por dia.

No Brasil, em contrapartida, na maior parte do país a necessidade de climatização é de refrigeração e a maioria das residências não dispõe de sistemas de condicionamento de ar. Mesmo nas residências brasileiras que possuem sistemas artificiais de climatização do ar, a operação contínua é incomum. Tal fato demonstra uma realidade distinta dos países de clima frio, onde a operação contínua é necessária em períodos extensos do ano.

O modelo superisolado necessita também de baixos valores de transmitância térmica e infiltração. A implementação de tais requerimentos em larga escala no Brasil implicaria em custos

adicionais em construção pela incorporação de materiais de construção mais caros. Implicaria igualmente em uma mudança profunda de capacitação de projeto e mão de obra. Os projetos e construção necessitariam eliminar pontes térmicas. Garantir níveis de infiltração, essenciais para o modelo superisolado, requer uma mão de obra capacitada e não é trivial.

A mão de obra capacitada seria também necessária para o projeto, instalação e comissionamento correto dos sistemas de recuperação de calor. A literatura mostra problemas nestes quesitos nos países desenvolvidos, que implicam em riscos de saúde.

Finalmente, a operação ótima do modelo superisolado requer a cooperação dos usuários, concordando em habitar em uma residência perenemente fechada, com renovação de ar exclusivamente mecânica. A literatura mostra resistências dos usuários à operação correta da recuperação de calor nos países desenvolvidos a operação (KIM e al., 2012; VAN DER PLUIJM, 2012).

Esta realidade é distinta da relação cultural com o meio externo no Brasil. As residências brasileiras buscam abertura e integração com o exterior, em varandas, sacadas e pátios. A abertura para o exterior e a renovação do ar através de abertura de janelas, são vistas como valores em si mesmos.

A adoção do modelo superisolado no Brasil obrigaria a uma mudança cultural que requer uma vivência de portas e janelas fechadas. Dúvidas da resistência cultural a este modelo de vivência são levantadas até no contexto da Europa do sul (SANTOS e LEAL, 2012). Dessa forma, é pertinente a busca de alternativas ao modelo superisolado de climatização para edifícios de energia zero no Brasil.

Analogamente, a definição de energia primária de edifício de energia zero, adotada nos países desenvolvidos, deve ser analisada. Do ponto de vista da matriz energética brasileira e dos consumos residenciais verifica-se também uma diferença marcada entre o contexto brasileiro com os seus contrapontos na União Europeia e Estados Unidos da América. Quanto maior o percentual de energia renovável na matriz energética menor a diferença entre as definições de edifício de energia zero local e primária. O Brasil apresenta uma das matrizes com maior parcela de geração renovável do mundo. Especificamente na geração de eletricidade 84% da geração provem de fontes renováveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013). Tal fato torna a escolha da definição primária de edifício de energia zero

virtualmente indistinguível da definição local no Brasil, ao contrário dos de União Europeia e Estados Unidos da América.

Igualmente o consumo energético residencial mensal brasileiro é inferior aos verificados na União Europeia e Estados Unidos da América. O uso de ar condicionado ainda é relativamente raro, tendo potencial de aumentar significativamente o consumo energético residencial mensal brasileiro se tomada em conta a literatura internacional (BRAVO e GONZÁLEZ, 2013; MEIER 2011; STRENGERS e MALLER, 2011). Tal fato é mais um argumento para a busca de métodos alternativos à climatização artificial e modelo superisolado.

Os exemplos de edifício de energia zero construídos em regiões tropicais (BUILDING & CONSTRUCTION AUTHORITY, 2013; GARDE e al., 2012) não seguem o modelo superisolado. Um dos exemplos utiliza bandas mais elevadas de temperatura de controle e sistemas pessoais de conforto, enquanto o outro se baseia na abertura do edifício para o exterior, no uso da ventilação natural, ventiladores de teto, utilizando o ar condicionado como último recurso. Estes exemplos apontam para um modelo distinto do superisolado para obtenção de conforto térmico em climas quentes.

### 3 MÉTODO

#### 3.1 O MODELO DE SIMULAÇÃO

##### 3.1.1 Introdução

O método descreve os procedimentos adotados para simular dois sistemas para obtenção de para conforto térmico na residência de energia zero Eko House e analisar os resultados. Os dois sistemas representam duas filosofias distintas.

Um sistema é designado de ventilação natural automática e otimiza a ventilação natural, automatizando a operação de áreas transparentes (janelas e portas). Por automatização da operação entende-se a abertura e fechamento das áreas transparentes, através de um sistema mecânico, de acordo com algoritmo pré-definido. O conforto térmico deste sistema é analisado segundo o modelo adaptativo da ASHRAE 55 2010. Este sistema representa um sistema para obtenção de para conforto térmico com maior interação com as condições térmica do meio externo. O outro sistema é designado de climatização artificial. A climatização artificial opera através de um sistema fluido variável de refrigerante (*variable refrigerant flow*). A temperatura do ar interno é mantida num intervalo fixo, de acordo com o modelo estático de conforto térmico. Este modelo representa a filosofia de operação de climatização artificial, estanque do meio exterior, como a seguida por o modelo superisolado. Note-se que climatização artificial, neste contexto, inclui aquecimento de ar assim como resfriamento, sempre que a temperatura interna descer do limite inferior do intervalo de controle ou ultrapassar o limite superior, respectivamente. O método é dividido em quatro etapas. As três primeiras etapas analisam o desempenho dos dois sistemas de obtenção de conforto térmico. A quarta etapa determina a geração fotovoltaica e analisa o balanço energético. Todas as simulações são anuais, utilizando arquivos climáticos TRY.

A primeira etapa é um estudo piloto. No estudo piloto, o desempenho de cada um dos dois sistemas é simulado com diferentes configurações de sombreamento e transmitância térmica do envelope. As mesmas configurações são simuladas para cada um dos dois sistemas. As configurações com melhor e pior desempenho para cada sistema são selecionadas para as próximas etapas. Os sistemas são avaliados através do desempenho em conforto térmico e consumo energético. O desempenho do sistema de ventilação natural

automática é avaliado através do seu desempenho em graus horas de desconforto medidos por a ASHRAE 55 2010. Adicionalmente, é avaliado o consumo energético dos motores elétricos responsáveis pela operação de brises e áreas transparentes. O desempenho do sistema climatização artificial é medido através somente do seu consumo energético, uma vez que a temperatura interna permanece dentro dos limites estabelecidos. Os modelos selecionados para a segunda etapa são resimulados com um algoritmo de sombreamento que modela a incidência de irradiação solar com uso de brises com baixa absorptância. Este resultado é comparado com a situação ideal simulada na primeira etapa, que ignora a incidência da irradiação solar nas superfícies por completo. Este procedimento é realizado para definir quanto o sombreamento de áreas transparentes com brises com baixa absorptância afeta conforto térmico e consumo energético. Na terceira etapa, é avaliado o desempenho de estratégias de otimização para os dois sistemas. Finalmente, a quarta etapa determina os valores de geração energética e os consumos de operação de brises e áreas transparentes, determina os balanços energéticos e analisa o balanço energético. Os desempenhos na quarta etapa são medidos pelo balanço energético.

O Quadro 1 apresenta uma síntese.

Quadro 1: Síntese das etapas do método

| BELÉM  |   | CURITIBA   |   |
|--|---|--|---|
| <b>PRIMEIRA ETAPA</b>  |   |  |   |
| Ventilação natural automática  | Climatização artificial   | Ventilação natural automática  | Climatização artificial   |
| 18 simulações (3 opções de sombreamento x 6 níveis de transmitância térmica)   | 18 simulações (3 opções de sombreamento x 6 níveis de transmitância térmica)  | 18 simulações (3 opções de sombreamento x 6 níveis de transmitância térmica)   | 18 simulações (3 opções de sombreamento x 6 níveis de transmitância térmica)  |
| Escolhidas simulações com menor e maior soma anual de graus hora de desconforto térmico  | Escolhidas simulações com menor e maior consumo energético anual  | Escolhidas simulações com menor e maior soma anual de graus hora de desconforto térmico  | Escolhidas simulações com menor e maior consumo energético anual  |
| <b>SEGUNDA ETAPA</b>   |   |  |   |
| 2 simulações: Resimulada menor soma anual de graus hora com novo algoritmo de sombreamento   | 1 simulação: Resimulado menor consumo energético anual com novo algoritmo de sombreamento   | 2 simulações: Resimulada menor soma anual de graus hora com novo algoritmo de sombreamento   | 1 simulação: Resimulado menor consumo energético anual com novo algoritmo de sombreamento   |
| Comparação e análise entre resultados da primeira e segunda etapa  | Comparação e análise entre resultados da primeira e segunda etapa   | Comparação e análise entre resultados da primeira e segunda etapa  | Comparação e análise entre resultados da primeira e segunda etapa   |
| <b>TERCEIRA ETAPA</b>  |   |  |   |
| 1 simulações: Resimulada menor soma anual entre as etapas 1 e 2, com dois conjuntos de temperaturas mensais para abertura de áreas transparentes | 9 simulações: Resimulado menor consumo energético anual entre etapas 1 e 2 com recuperação de calor sensível e latente (8 casos) mais intervalo de controle de temperatura adaptativo | 1 simulações: Resimulada menor soma anual entre as etapas 1 e 2, com dois conjuntos de temperaturas mensais para abertura de áreas transparentes | 9 simulações: Resimulado menor consumo energético anual entre etapas 1 e 2 com recuperação de calor sensível e latente (8 casos) mais intervalo de controle de temperatura adaptativo |
| Comparação e análise entre resultados da segunda e terceira etapa  | Comparação e análise entre resultados da segunda e terceira etapa   | Comparação e análise entre resultados da segunda e terceira etapa  | Comparação e análise entre resultados da segunda e terceira etapa   |

| QUARTA ETAPA  |   |  |  |
|---|---|--|--|
| Cálculo da geração fotovoltaica para Belém e consumos energéticos de operação de brises e áreas transparentes |   | Cálculo da geração fotovoltaica para Curitiba e consumos energéticos de operação de brises e áreas transparentes |  |
| Cálculo de balanço energético para menor e maior consumo energéticos das três etapas                          | Cálculo de balanço energético para menor e maior consumo energético das três etapas | Cálculo de balanço energético para menor e maior consumo energéticos das três etapas                             | Cálculo de balanço energético para menor e maior consumo energéticos das três etapas |
| Análise da diferença entre balanços energéticos   | Análise da diferença entre balanços energéticos                                     | Análise da diferença entre balanços energéticos  | Análise da diferença entre balanços energéticos                                      |

Fonte: autor

### 3.1.2 Geometria

A geometria do modelo é um paralelepípedo com as dimensões de 8,35 m por 5,70 m por 2,70 m, resultando em uma área de 47,59 m<sup>2</sup> e um volume de 128,51 m<sup>3</sup>. Estas dimensões referem-se à área interna (condicionada) do edifício que corresponde às dimensões do modelo.

A Figura 31 apresenta a uma figura da Eko House montada em Madri e da geometria simplificada do modelo de simulação.



Figura 31: Comparação da Eko House e da geometria do modelo de simulação.

Fonte: Solar Decathlon Europe (2013) e autor.

A geometria do modelo é uma adaptação da Eko House. O projeto original da Eko House consistia de três elementos:

- Um paralelepípedo que continha a área condicionada;
- Uma cobertura, estruturalmente independente da área condicionada, criando uma varanda à volta da casa e alojando os módulos fotovoltaicos e coletores solares;
- Um volume destacado da área condicionada que concentrava a maioria dos sistemas técnicos.

O modelo geométrico deste trabalho elimina a cobertura e o volume técnico. A área condicionada é mantida sem alterações.

O modelo apresenta duas zonas térmicas ilustradas na Figura 32. A primeira zona térmica apresenta uma planta livre (*open space*) que inclui cozinha, sala e quarto de acordo com o projeto da Eko House. A primeira zona térmica tem uma área de 44,24 m<sup>2</sup> e um volume de 119,49 m<sup>3</sup>.

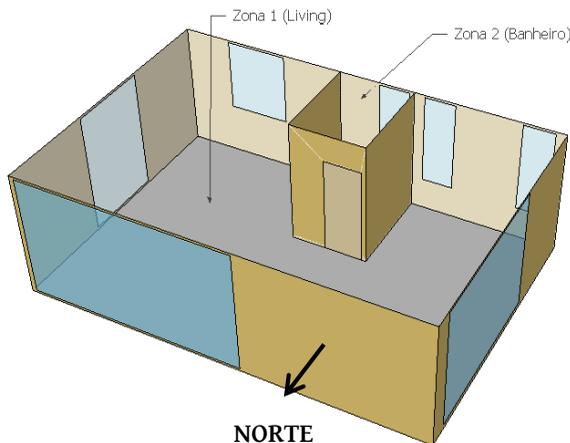


Figura 32: Ilustração das duas zonas térmicas. Fonte: autor.

A primeira zona térmica tem uma forma não retangular. Este fato cria limitações nos algoritmos passíveis de ser utilizados para distribuição de luz solar por a diversas superfícies internas da zona. No entanto, julgou-se mais importante a manutenção da forma externa da geometria

A segunda zona térmica representa o banheiro com área de 3,36 m<sup>2</sup> com um volume de 9,12 m<sup>3</sup>. A segunda zona térmica tem uma área

retangular. A Figura 32 mostra as duas zonas térmicas no modelo de simulação.

Todos os modelos são simulados levantados do solo sem contato com o mesmo, mantendo o projeto original da Eko House, baseada em módulos pré-fabricados a serem montados em poucos dias *in situ*. Adicionalmente, na tradição de casas de madeira nas regiões norte e sul as casas são montadas levantadas do solo. O piso é simulado com a opção *nosun* e *windexposed*.

A EkoHouse foi escolhida por ser um modelo de edifício residencial de energia de energia zero projetado e construído no Brasil, pensado e produzido segundo uma lógica industrial, já testado em campo, concebido para maximizar a sua geração de energia com o sistema fotovoltaico. O seu sistema estrutural permite facilmente acoplar diferentes opções de sombreamento. O sistema construtivo, com paredes sanduiche, permite facilmente a variação da transmitância térmica alterando a espessura das camadas de isolamento térmico. A sua planta livre, também, maximiza o desempenho da ventilação natural.

A Tabela 10 apresenta uma síntese dos dados das áreas transparentes, que estão numeradas e localizadas no modelo na Figura 33.

Tabela 10: Áreas e orientação das áreas transparentes.

| Nome                           | Área de vidro [m <sup>2</sup> ] | Sistema de sombreamento [ ] | Azimute [°] | Inclinação em relação à horizontal [°] | Orientação [ ] |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------|--|----------------|
| 1 (Porta sala norte)           | 11,7                            | Sim                         | 0           | 90                                     | Norte          |
| 2 (Janela sala oeste)          | 4,52                            | Sim                         | 90          | 90                                     | Oeste          |
| 3 (Janela cozinha sul)         | 2,01                            | Sim                         | 180         | 90                                     | Sul            |
| 4 (Janela banheiro sul)        | 1,69                            | Sim                         | 180         | 90                                     | Sul            |
| 5 (Janela quarto sul banheiro) | 1,27                            | Sim                         | 180         | 90                                     | Sul            |
| 6 (Janela quarto sul leste)    | 1,27                            | Sim                         | 180         | 90                                     | Sul            |
| 7 (Porta sala leste)           | 8,64                            | Sim                         | 270         | 90                                     | Leste          |

Fonte: autor.

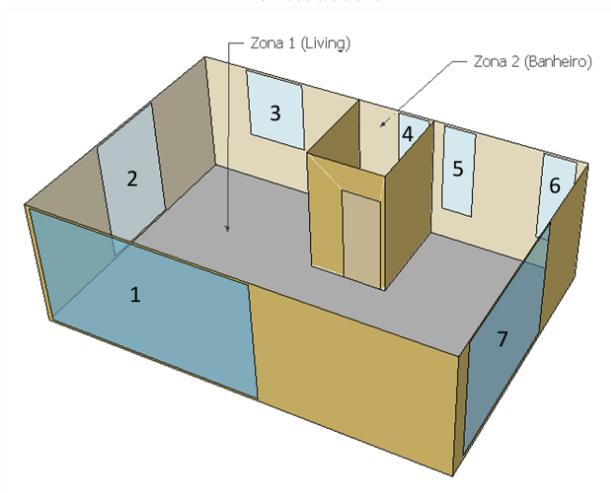


Figura 33: Indicação das áreas transparentes. Fonte: autor.

### 3.1.3 Sistema fotovoltaico

Para geração de energia renovável, a Eko House utiliza um sistema fotovoltaico na cobertura. Este foi o sistema utilizado no *Solar Decathlon Europe 2012* e é mantido pois permite conter a instalação do sistema à implantação do edifício. Adicionalmente, o retorno sobre energia investida dos sistemas fotovoltaicos atualmente equiparável ao petróleo (RAUGEI e al., 2012).

A geometria do painel fotovoltaico da Eko House é alterada no modelo de simulação. O painel da Eko House tem uma água com inclinação de 15 ° composto de módulos com eficiência de 18%. No modelo de simulação, o painel de uma água é dividido em dois painéis formando duas águas. As águas apresentam uma inclinação de 7° e área total das duas águas de 81,00 m<sup>2</sup>. Esta cobertura é composta por 48 módulos fotovoltaicos.

A inclinação do painel fotovoltaico era de 7° no projeto original sendo alterado para competição em Madri para maximizar geração durante o período da competição. A solução adotada para simulação maximiza o aproveitamento de área em coberturas planas, que era a opção original do projeto e foi mantida. A opção original do projeto era apresentar um só modelo de casa para todo o Brasil, para reduzir custos. Adicionalmente, a cobertura plana reduz ao máximo a sombra da casa no terreno circundante. O menor sombreamento do terreno permite implantar outras Eko House mais perto, permitindo densificar a implantação em termos de área. Arquiteturalmente também, a cobertura plana é, estilisticamente, parte do *canon* da arquitetura moderna e, portanto, associada à ideia de projeto moderno para o futuro. Dessa forma, a cobertura plana foi escolhida. Esta opção implica em perdas de geração no caso de Curitiba, dada a inclinação subótima para a geração fotovoltaica anual. No entanto, assumido o arranjo adotado maximiza a geração em coberturas planas de acordo com Bayod-Rújula e al. (2011).

Para Belém, a inclinação teórica ótima, entre 1 ° e 2 °, seria insuficiente para permitir a autolimpeza dos módulos fotovoltaicos, sendo, portanto, a inclinação de 7 ° de acordo com melhores práticas.

A área total dos dois painéis corresponde à área do painel original da Eko House. As dimensões do painel são congruentes com as dimensões dos módulos utilizados na Eko House. Os módulos utilizados no painel da Eko House têm as dimensões de 1,60 m por 0,80 m.

Um dos painéis é orientado a norte e outro a sul. É uma simplificação de simulação que representa a colocação dos módulos fotovoltaicos em cima de uma cobertura plana. Na situação real, fileiras de módulos orientados a norte e sul se sucederiam.

A área total dos dois painéis é ligeiramente maior que a área de cobertura formada pelas duas zonas condicionadas. Os painéis são centralizados por cima das zonas condicionadas. A linha de cumeeira dos dois painéis fotovoltaicos é alinhada por cima da linha média longitudinal da cobertura do volume das áreas condicionadas. A linha média transversal dos dois painéis é alinhada por cima da linha média transversal do volume das áreas condicionadas.

### **3.1.4 Propriedades térmicas e óticas dos vidros e esquadria das áreas transparentes.**

Todas as áreas transparentes em todos os vãos usam um vidro duplo com câmara de ar com argônio. Ambos os panos de vidro são laminados com 8,3 mm de espessura. A câmara de ar tem 12 mm. Cada pano é composto por duas lâminas de vidro *Float* com uma camada intermediária de 0,3 mm de filme de Polivinil butiral, que cria uma barreira radiante. O pano de vidro em contato com o exterior tem a face interna (orientada para a câmara de ar) revestida por uma película de baixa emissividade.

O vidro em questão foi montado sobre medida por um patrocinador da equipe brasileira do *Solar Decathlon Europe* para a competição. As propriedades térmicas do vidro foram calculadas através do programa *Window*. O programa *Window* é uma criação do *Lawrence Berkeley National Laboratory* para o cálculo das propriedades térmicas de vidros. Este programa contém uma base em constante atualização das propriedades térmicas e óticas dos vidros disponíveis no mercado norte americano de diversos fabricantes.

Através do programa *Window*, foram calculadas as propriedades térmicas de cada um dos dois panos de vidro laminado. Como resultado, obteve-se dois conjuntos de propriedades térmicas, um conjunto para cada pano de vidro. Cada um dos dois conjuntos de propriedades térmicas representa o desempenho do pano laminado de vidro como um todo.

As propriedades do pano interno foram calculadas utilizando as propriedades térmicas retiradas da base de dados de programa *Window*. A entrada de dados selecionada refere-se ao vidro *Float* de 4 mm do patrocinador e fornecedor dos vidros da *Eko House*. A base de

dados do programa Windows não apresentava nenhuma entrada para filme Polivinil butiral referindo o patrocinador e fornecedor. Dessa forma, foi selecionada uma entrada de dados definida no programa como genérica (sem fabricante específico) referente a um filme de Polivinil butiral com 0,3 mm de espessura.

As propriedades do pano externo foram calculadas utilizando um artifício de simulação. O pano exterior tem uma película de baixa emissividade na face interna que está em contato com a câmara de ar. Talvez pelo vidro ter sido feito sob medida, a base de dados não apresentava nenhum vidro laminado de 4,0 mm com película de baixa emissividade do patrocinador e fornecedor do vidro da Eko House. Existia, no entanto, uma entrada para vidro de baixa emissividade de 2 mm. Um vidro laminado foi então composto com uma camada de 6mm de vidro Free Float do fornecedor da Eko House (camada em contato com o meio exterior) um filme de Polivinil butiral de 0,3 mm (filme genérico, sem fabricante definido) e um vidro de baixa emissividade de 2mm do fornecedor da Eko House (camada em contato com a caixa de ar).

As propriedades agregadas assim obtidas de cada um dos dois panos de vidro foram depois introduzidas no programa EnergyPlus para compor um vidro duplo. Esse vidro é para o programa EnergyPlus, composto de três camadas: duas camadas de vidro laminado e uma câmara de ar intermediária. A camada externa, com 8,3 mm, tem as propriedades térmicas e óticas do pano de vidro externo calculadas no programa Window. A camada intermediária, com de 12 mm, corresponde à câmara de ar preenchida com argônio. Finalmente, uma camada interna, de 8,3 mm com as propriedades térmicas e óticas calculadas para o pano interno de vidro.

A Tabela 11 mostra os dados térmicos dos panos de vidros tal como introduzidos no EnergyPlus. O pano EKO EXT 8mm representa o pano de vidro com a película de baixa emissividade.

Tabela 11: Dados térmicos e óticos dos panos de vidro.

---

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:GLAZING
=====
WindowMaterial:Glazing,
  EKO INT 8mm,      !- Name
  SpectralAverage,  !- Optical Data Type
  ,                !- Window Glass Spectral Data Set Name
  0.0083,          !- Thickness {m}
  0.698,           !- Solar Transmittance at Normal Incidence
  0.066,           !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence
  0.066,           !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
  0.869,           !- Visible Transmittance at Normal Incidence
  0.079,           !- Front Side Visible Reflectance at Normal
Incidence
  0.079,           !- Back Side Visible Reflectance at Normal
Incidence
  0,               !- Infrared Transmittance at Normal Incidence
  0.837,           !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity
  0.837,           !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity
  0.7288014;      !- Conductivity {W/m-K}

WindowMaterial:Glazing,
  EKO EXT 8mm,     !- Name
  SpectralAverage,  !- Optical Data Type
  ,                !- Window Glass Spectral Data Set Name
  0.0083,          !- Thickness {m}
  0.222,           !- Solar Transmittance at Normal Incidence
  0.293,           !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence
  0.531,           !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
  0.531,           !- Visible Transmittance at Normal Incidence
  0.172,           !- Front Side Visible Reflectance at Normal
Incidence
  0.158,           !- Back Side Visible Reflectance at Normal
Incidence
  ,               !- Infrared Transmittance at Normal Incidence
  0.837,           !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity
  0.037,           !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity
  0.9,             !- Conductivity {W/m-K}
  1,              !- Dirt Correction Factor for Solar and Visible
Transmittance
  No;             !- Solar Diffusing

```

---

Fonte: autor.

A resistência térmica da câmara de ar é calculada automaticamente pelo EnergyPlus partindo dos dados de entrada apresentados na Tabela 12.

---

Tabela 12: Dados de entrada para a câmara de ar do vidro duplo.

---

```
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:GAS
=====
```

```
WindowMaterial:Gas,
  000_ARGON 12mm,      !- Name
  Argon,               !- Gas Type
  0.0117;              !- Thickness {m}
```

(Os restantes campos foram deixados em branco e não são apresentados nesta tabela)

---

Fonte: autor.

Como resultado, as propriedades térmicas e óticas calculadas para as áreas transparentes, como um todo por o EnergyPlus, são descritas na Tabela 13.

Tabela 13: Propriedades das áreas transparentes com vidro duplo da Eko House e modelo de simulação.

| Superfície da janela           | Área de vidro [m <sup>2</sup> ] | Área de vidro por quadrante [m <sup>2</sup> ] | Transmitância térmica do vidro (Fator U) [W/m <sup>2</sup> K] | SHGC do vidro [unidade] | Fator solar do vidro [unidade] | Azimute [°] | Inclinação do pano de vidro com horizontal [°] |
|--------------------------------|---------------------------------|---|---|-------------------------|--------------------------------|-------------|--|
| 1 (Porta sala norte)           | 11,7                            | 11,7  | 1,32  | 0,24                    | 0,47                           | 0           | 90   |
| 2 (Janela sala oeste)          | 4,52                            | 4,52  | 1,32  | 0,24                    | 0,47                           | 90          | 90   |
| 3 (Janela cozinha sul)         | 2,01                            | 6,24  | 1,32  | 0,24                    | 0,47                           | 180         | 90   |
| 4 (Janela banheiro sul)        | 1,69                            | 6,24  | 1,32  | 0,24                    | 0,47                           | 180         | 90   |
| 5 (Janela quarto sul banheiro) | 1,27                            | 6,24  | 1,32  | 0,24                    | 0,47                           | 180         | 90   |
| 6 (Janela quarto sul leste)    | 1,27                            | 6,24  | 1,32  | 0,24                    | 0,47                           | 180         | 90   |
| 7 (Porta sala leste)           | 8,64                            | 8,64  | 1,32  | 0,24                    | 0,47                           | 270         | 90   |

Fonte: autor.

A esquadria usada no modelo de simulação da tese é a mesma utilizada na Eko House. É uma esquadria de PVC produzida industrialmente. A transmitância térmica é calculada a partir dos desenhos de detalhamento da esquadria.

A Figura 34 apresenta o detalhe da esquadria utilizada na Eko House e modelo de simulação da tese. A esquadria tem a largura de 0,056 m. Devido à configuração complexa do detalhe, a esquadria é dividida conceitualmente em sete seções. As seções são transversais. Isto é, formam linhas de corte do exterior para interior, empilhadas verticalmente no sentido cobertura-pavimento. A Figura 34 também indica a localização das seções utilizadas para cálculo da transmitância térmica, sobreposta ao detalhe construtivo da esquadria.

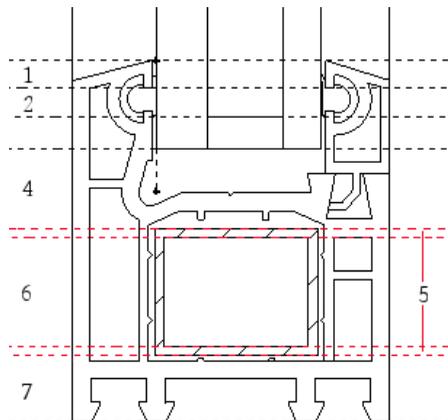


Figura 34: Detalhe da esquadria da Eko House e modelo de simulação da tese.  
Fonte: autor.

O cálculo de resistência térmica equivalente é feito para cada seção. Posteriormente as resistências térmicas equivalentes de cada seção são ponderadas por área de exposição ao exterior. O cálculo é feito através da NBR 15.220, que acarreta limitações. A Tabela 14 apresenta uma síntese do cálculo de resistência térmica equivalente por seções.

A Tabela 14 apresenta somente uma síntese do cálculo. O cálculo detalhado da resistência térmica de cada seção é apresentado no apêndice B, dada a sua extensão. Determinada a resistência térmica equivalente da esquadria é possível determinar o valor da transmitância térmica da esquadria em 0,88 W/m<sup>2</sup>K (resistência térmica de 1,13 m<sup>2</sup>K/W).

Tabela 14: Síntese do cálculo de resistência térmica equivalente da esquadria por seções.

| Seção | Somatório de Resistências Térmicas da Seção [m <sup>2</sup> K/W] | Coefficiente de Ponderação de Área da Seção [m <sup>2</sup> K/W] | Resistência Térmica Ponderada da Seção [m <sup>2</sup> K/W] | Transmitância Térmica Ponderada da Seção [m <sup>2</sup> K/W] |
|-------|--|--|---|---|
| 1     | 1,04   | 0,09   | 0,1   | 10,00   |
| 2     | 0,56   | 0,07   | 0,04  | 25,00   |
| 3     | 0,58   | 0,09   | 0,05  | 20,00   |
| 4     | 1,23   | 0,21   | 0,26  | 3,85  |
| 5     | 0,63   | 0,05   | 0,03  | 33,33   |
| 6     | 1,47   | 0,32   | 0,47  | 2,13  |
| 7     | 1,11   | 0,17   | 0,19  | 5,26  |
| Total |  |  | 1,13  | 0,88  |

Fonte: autor.

### 3.1.5 Padrão de ocupação

Todos os modelos de simulação utilizam o mesmo padrão de ocupação. O modelo de simulação prevê a ocupação de duas pessoas. A taxa metabólica das ocupantes é definida através do objeto *compact schedule* denominado “*ActivitySch*” com o valor de 131,80 W por pessoa durante todo o período de ocupação. A fração radiante é definida em 0,3, valor padrão do EnergyPlus.

A Figura 35 descreve o padrão de ocupação.

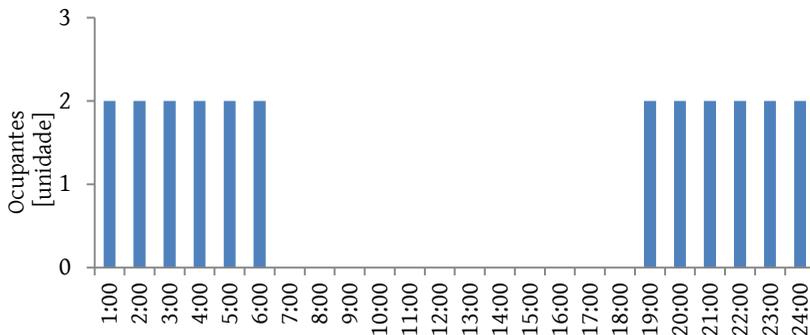


Figura 35: Padrão de ocupação. Fonte: autor.

### 3.1.6 Descrição do sistema de iluminação e padrão de uso

Todos os modelos de simulação utilizam o mesmo sistema de iluminação com o mesmo padrão de uso. Todas as lâmpadas são LED. É assumida uma fração radiante de 0,20, o valor padrão do EnergyPlus. A Figura 36 apresenta a distribuição de potência instalada por área funcional do modelo de simulação. Dada a disparidade de área entre as zonas térmicas 1 e 2, a maioria das lâmpadas está instalada na zona térmica 1.

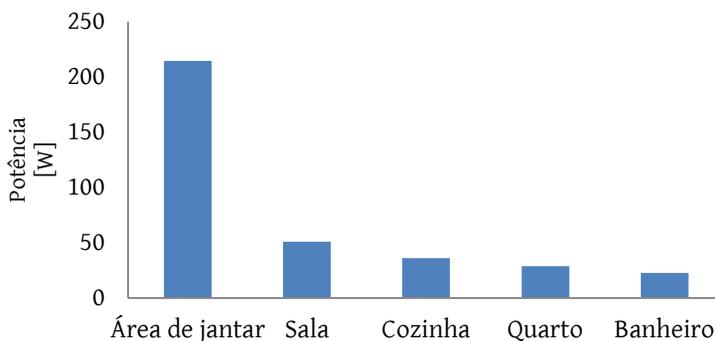


Figura 36: Potência de iluminação instalada por área funcional. Fonte: autor.

A simulação calcula a carga térmica do sistema de iluminação utilizada para os equipamentos. É definido um *design level*, controlado com padrão de uso definido, através de um objeto *compact schedule*.

No entanto, ao contrário dos equipamentos que estão concentrados em uma única zona térmica, o sistema de iluminação abrange as duas zonas térmicas. Dessa forma são utilizados dois objetos *compact schedule* diferentes para cada zona térmica. O valor de potência de operação adotado no *design level* é de 329,94 W para a zona térmica 1 e de 22,60 W para a zona térmica 2 (banheiro). A Tabela 15 descreve o sistema de iluminação com cálculo de potência para cada área.

Tabela 15: Descrição do sistema de iluminação.

| Zona térmica | Área Funcional | Quantidade [unidade] | Grandeza | Potência por item [W] | Potência subtotal [W] |
|--------------|----------------|----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| Zona 1       | Área de Sala   | 43,00                | Unidade  | 4,50                  | 193,5                 |
|              | Sala           | 1,00                 | Unidade  | 7,50                  | 7,50                  |
|              | Sala           | 1,00                 | Unidade  | 7,50                  | 7,50                  |
|              | Sala           | 869,00               | cm       | 0,04                  | 35,84                 |
|              | Área de jantar | 3,00                 | Unidade  | 7,00                  | 21,00                 |
|              | Cozinha        | 4,00                 | Unidade  | 4,50                  | 18,00                 |
|              | Cozinha        | 4,00                 | Unidade  | 4,50                  | 18,00                 |
|              | Quarto         | 5,00                 | Unidade  | 4,50                  | 22,60                 |
|              | Quarto         | 150,00               | cm       | 0,04                  | 6,00                  |
|              |                |                      |          | Subtotal              |                       |
| Zona 2       | Banheiro       | 5,00                 | Unidade  | 4,50                  | 22,60                 |
|              |                |                      | Subtotal |                       | 22,60                 |
|              |                |                      |          | Total                 | 352,54                |

Fonte: autor.

Os cálculos de consumo energético do sistema de iluminação são feitos multiplicando a potência das lâmpadas por o tempo de uso. Algumas das lâmpadas LED da Eko House permitem dimerização. No entanto, foi considerado que as lâmpadas operam sempre no seu pico de potência.

A Figura 37 descreve o padrão de uso do sistema de iluminação. Note-se que para melhor entendimento a Figura 37 apresenta o padrão de uso das zonas térmicas 1 e 2 juntas. A rigor, na simulação, existem dois padrões de uso, um para cada zona térmica.

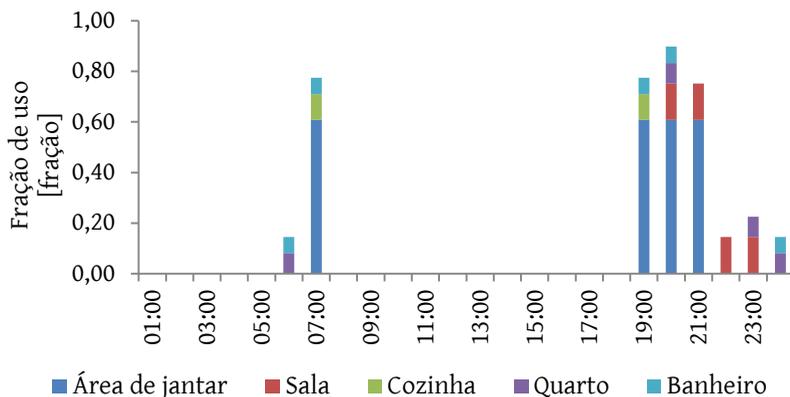


Figura 37: Padrão de uso do sistema de iluminação. Fonte: autor.

### 3.1.7 Descrição dos equipamentos e aquecimento de água doméstica e padrão de uso

Todos os modelos de simulação usam os mesmos equipamentos com o mesmo padrão de uso. Por equipamentos entendem-se todos os eletrodomésticos e equipamentos com consumo elétrico e geração de carga térmica localizados no interior da zona climatizada do modelo. Assume-se uma fração radiante de 30 % para todos os equipamentos, o valor padrão no EnergyPlus.

Os consumos energéticos médios da lavadora e secadora roupa, geladeira e TV são retirados do site do INMETRO (2011a). O valor de consumo médio do notebook foi retirado do site do fabricante. No caso da geladeira, os valores de consumo mensal são retirados do site do INMETRO (2011a) que não indicam o valor máximo de potência. Os catálogos do fabricante também não apresentam o valor de potência máxima da geladeira e sim o valor de consumo mensal previsto. Finalmente, a máquina lava roupa é prevista ser utilizada uma vez por semana. O valor de consumo energético médio de um ciclo da assume 3,3 kWh foi dividido por sete dias, obtendo o valor de 0,47 kWh dia (arredondado para 0,5), sendo esse o valor utilizado na tabela. A máquina lava roupa inclui uma secadora, mas o consumo do ciclo de

secagem, é excluído no valor apresentado no site do INMETRO (2011a) então somente a lavagem de roupa é considerada.

Para o forno elétrico e fogão de indução foram adotados os valores de pico de potência multiplicados por um tempo arbitrado arbitrariamente de uso. Não foi possível encontrar valores de consumo médio para o forno elétrico e fogão de indução. A utilização do valor de pico serve também para contabilizar um uso maior do forno elétrico e fogão de indução dada a falta de dados empíricos sobre consumos energéticos destes equipamentos. O forno elétrico e fogão de indução são utilizados decorrente do intuito de simular o desempenho de um edifício de energia zero local, que supre todos os seus consumos energéticos com geração renovável própria. Note-se todos os equipamentos utilizados na simulação foram definidos para a Eko House. Dessa forma, já apresentam um elevado grau de eficiência energética. Um equipamento presente na Eko House é excluído da simulação: uma máquina de lavar louça, pois sua posse e uso ainda é rara na realidade brasileira.

O consumo energético de água quente é o mesmo para todas as simulações. Assume o uso de um chuveiro elétrico de 5000 W de potência, 20 minutos por dia, 10 minutos de manhã (06h00min) e outros 10 à noite (19h00min).

A Tabela 16 enumera e descreve os equipamentos utilizados no modelo de simulação, acrescentando o valor de consumo energético de aquecimento de água e salientando os consumos energéticos do forno elétrico e fogão de indução por serem raros na realidade brasileira.

Tabela 16: Equipamentos das zonas condicionadas.

| Equipamento         | Localização | Potência [W] | Uso diário [minuto] | Consumo diário [kWh] | Consumo mensal [kWh] | Subtotal mensal [kWh] |
|---------------------|-------------|--------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Geladeira           | Cozinha     | -            | 1440,00             | 1,80                 | 55,00*               |                       |
| Televisão 32' LED   | Living      | 140,00       | 300,00              | 0,70                 | 21,00                |                       |
| Lava roupa          | Cozinha     | 2200,00      | 12,90               | 0,50                 | 14,10**              |                       |
| Notebook 13'        | Living      | 18,00        | 300,00              | 0,10                 | 2,70                 | 92,80                 |
| Aquecimento de água | Banheiro    | 5000,00      | 20,00               | 1,70                 | 50,00                | 50,00                 |
| Forno elétrico      | Cozinha     | 3570,00      | 5,00                | 0,30                 | 8,90                 |                       |
| Fogão de indução    | Cozinha     | 6300,00      | 5,00                | 0,50                 | 15,80                | 24,70                 |
| Total               |             |              |                     | 5,60                 | 167,50               | 167,5                 |

\*O valor de consumo mensal médio da geladeira foi retirado do site do INMETRO (2011b) \*\*Consumo equivalente a um ciclo por semana. Fonte: autor.

Note-se que o valor total de consumo energético não pode ser comparado diretamente ao consumo energético médio mensal brasileiro. Este valor não inclui o consumo de iluminação e inclui 24,7 kWh/mês adicionais, referentes ao consumo energético do forno elétrico e fogão de indução, que não são comuns na realidade brasileira. No entanto, adicionando 92,8 kWh (equipamentos), 50,0 kWh (aquecimento de água) e 40,8 kWh (iluminação, determinado na sessão anterior), resulta em consumo energético mensal médio de 183,60 kWh, valor este passível de comparação com o consumo elétrico médio anual. Adicionando ao valor de 183,60 kWh/mês o consumo do

forno elétrico e fogão de indução, resulta num consumo energético de eletricidade mensal médio de 208,30 kWh/mês.

A simulação usa a opção *design level* controlado com padrão de uso definido através de um objeto *compact schedule*. O valor de potência de operação adotado no *design level* é de 232,66 W. Os valores do objeto *compact schedule* são apresentados na Figura 38, que também mostra os horários de uso de cada equipamento.

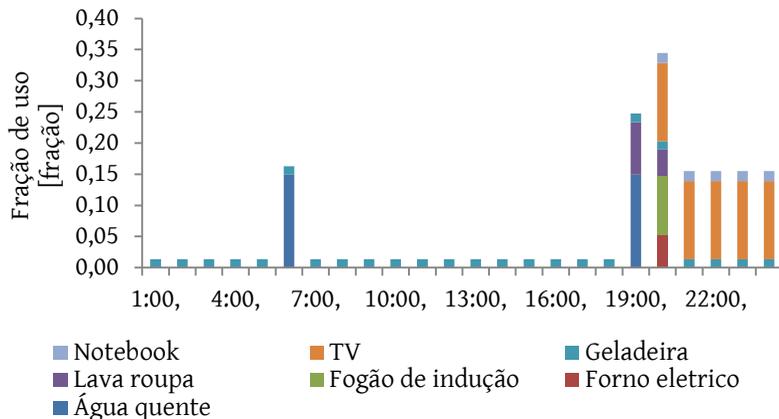


Figura 38: Padrão de uso dos equipamentos. Fonte: autor.

A potência de operação do *design level* é determinada através do consumo estimado para os equipamentos e não do valor do consumo de pico. O consumo estimado mensal foi convertido em potência instantânea. Este procedimento é aconselhado no manual *in out reference* do EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2013). Note-se que o para o caso do forno elétrico e fogão de indução a estimativa de consumo utilizou a potência de pico para o cálculo. O consumo elétrico mensal dos equipamentos estimado em 167,52 kWh, é convertido em Joule.

$$167,52 \text{ kWh} * 3600000,00 = 603064285,71 \text{ J} \quad \text{Equação 6}$$

Seja E, energia (J) e t, tempo (s), a potência é igual a:

$$P = \frac{E}{t} \quad \text{Equação 7}$$

Dividindo o valor do consumo energético mensal ( 603064285 J) por o número de segundo em um mês de 30 dias (2.592.000,00 s).

$$P = \frac{603064285,71}{2592000,00} \text{ W} \quad \text{Equação 8}$$

Obtém-se o valor de 232,66 W para o *design level*.

Os consumos energéticos horários ao longo das vinte e quatro horas do dia são convertidos em frações do *design level*, no objeto *compact schedule*, conforme apresentados na Figura 38.

A máquina de lavar roupa, na Eko House, situava-se fora da zona condicionada na área de varanda. O modelo de simulação eliminou as varandas. Consequentemente, assume-se que a máquina de lavar e secar roupa encontra-se dentro da zona condicionada.

### 3.1.8 Cidades simuladas

A pesquisa enfoca duas cidades: Belém e Curitiba, que apresentam o maior número de graus horas de desconforto anuais por calor e frio, respectivamente. Belém representa as condições climáticas extremas de calor quente e úmido no território brasileiro. Curitiba representa as condições climáticas extremas de frio no território brasileiro. A escolha de capitais estaduais decorre de um compromisso. O compromisso entre a escolha de localizações geográficas com condições climáticas mais extremas que simultaneamente possuem populações urbanas significativas. A busca de condições climáticas extremas visa pesquisar estratégias de projeto mais válidas para as condições mais desfavoráveis presentes no território brasileiro, assumindo-se que as estratégias para os extremos podem ser adaptadas para o resto do território brasileiro.

Belém localiza-se no paralelo 1º ao nível do mar apresentando um clima equatorial com temperaturas médias elevadas, apresentando pouca variação de temperatura, quer diária quer sazonal. Apresenta elevada precipitação média mensal superior a 60 mm em todos os meses. Apesar da precipitação média mensal nunca ser inferior a 60 mm (verifica-se ser sempre superior a 100 mm) de acordo a caracterização Koppen para clima equatorial, apresenta uma sazonalidade semelhante aos climas tropicais de monção, com duas estações definidas. Uma estação de menor precipitação (de junho a novembro) e outra estação com maior precipitação (de dezembro a maio). A época de menor precipitação apresenta maiores temperaturas médias. A velocidade média mensal varia entre a 0,7 m/s a 1,15 m/s, auxiliando a atingir condições de conforto sendo superior a 1,0 m/s somente de agosto a novembro.

## A Tabela 17 compila dados climáticos de Belém.

Tabela 17: Dados climáticos mensais de Belém.

| Dados climáticos | Temperatura média |                  |                       | Temperatura |             | Velocidade média do ar [m/s] | Precipitação [mm] | Irradiação solar global horizontal [Wh/m <sup>2</sup> ] |
|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------------|---|
|                  | Bulbo seco [C°]   | Bulbo úmido [C°] | Ponto de orvalho [C°] | Máxima [C°] | Mínima [C°] |                              |                   |   |
| Janeiro          | 26,51             | 24,16            | 23,38                 | 34,90       | 21,60       | 0,97                         | 366,5             | 4740  |
| Fevereiro        | 26,98             | 24,62            | 23,85                 | 31,70       | 21,90       | 0,96                         | 417,5             | 4720  |
| Março            | 27,36             | 24,78            | 23,94                 | 31,70       | 21,80       | 0,98                         | 436,2             | 4777  |
| Abril            | 26,62             | 24,68            | 24,06                 | 32,00       | 22,30       | 0,76                         | 360,0             | 4682  |
| Maió             | 27,19             | 24,86            | 24,11                 | 33,00       | 21,80       | 0,84                         | 304,4             | 4798  |
| Junho            | 27,09             | 24,03            | 22,97                 | 32,80       | 21,30       | 1,00                         | 140,2             | 4907  |
| Julho            | 27,18             | 23,93            | 22,79                 | 33,30       | 21,40       | 1,00                         | 152,1             | 5251  |
| Agosto           | 27,39             | 23,99            | 22,80                 | 33,80       | 21,40       | 1,07                         | 131,1             | 5538  |
| Setembro         | 27,74             | 24,10            | 22,83                 | 33,20       | 21,20       | 1,15                         | 140,8             | 5515  |
| Outubro          | 27,51             | 24,11            | 22,92                 | 33,00       | 20,70       | 1,10                         | 116,1             | 5669  |
| Novembro         | 27,48             | 24,20            | 23,08                 | 34,20       | 20,00       | 1,04                         | 111,8             | 5363  |
| Dezembro         | 26,84             | 24,06            | 23,11                 | 33,40       | 21,50       | 0,97                         | 216,4             | 5041  |
| Anual            | 27,16             | 24,29            | 23,31                 | 33,08       | 21,41       | 0,99                         | 2893,1            | 5083  |

Nota: Maiores valores mensais sublinhados e os menores valores em negrito.  
 Fonte: EnergyPlus (TRY) e Organização Meteorológica Mundial.

Curitiba situa-se no paralelo 25°S a uma altitude de 900 m. Curitiba apresenta um clima subtropical úmido, com estações marcadas, verões quentes e invernos frios e amplitudes térmicas diárias elevadas, podendo exceder os 10 °C. A temperatura média mensal nunca ultrapassa os 20 °C, podendo, no entanto, apresentar máximos acima de 30 °C, especialmente durante o verão. A precipitação mensal é maior durante o verão (de dezembro a março) que correspondem ao período com maiores temperaturas mensais médias. As menores temperaturas médias mensais ocorrem nos períodos de menor precipitação. A velocidade média mensal do ar varia de 1,60 m/s até 2,66 m/s, verificando-se as maiores velocidades nos meses de maior calor. Embora no verão velocidades elevadas do ar possam auxiliar no conforto térmico, valores médios acima de 1,0 m/s podem ser excessivos, mesmo em condições de calor. Para os meses de

invernos as velocidades médias mensais do ar são bastantes superiores ao limite de conforto térmico, agravando a desconforto térmico por frio. A Tabela 18 apresenta dados climáticos de Curitiba.

Tabela 18: Dados climáticos mensais de Curitiba

| Dados climático | Temperatura média |                  |                       | Temperatura |             | Velocidade de média do ar [m/s] | Precipitação [mm] | Irradiação solar global horizontal [Wh/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------------------|-------------|-------------|---------------------------------|-------------------|---|
|                 | Bulbo seco [C°]   | Bulbo úmido [C°] | Ponto de orvalho [C°] | Máxima [C°] | Mínima [C°] |                                 |                   |   |
| Janeiro         | 19,62             | 17,18            | 16,09                 | 30,5        | 14,20       | 2,66                            | 165,00            | 4228  |
| Fevereiro       | 20,87             | 17,82            | 16,44                 | 29,1        | 13,90       | 2,34                            | 142,1             | 5013  |
| Março           | 19,94             | 16,95            | 15,51                 | 29,2        | 13,70       | 2,14                            | 126,6             | 4458  |
| Abril           | 17,86             | 15,42            | 14,17                 | 28,2        | 8,30        | 1,60                            | 90,0              | 3816  |
| Mai             | 15,02             | 12,41            | 10,81                 | 26,6        | 6,20        | 1,89                            | 99,2              | 3414  |
| Junho           | 13,65             | 11,36            | 9,66                  | 23,9        | -0,10       | 1,87                            | 98,1              | 2808  |
| Julho           | 15,39             | 11,84            | 9,44                  | 26,5        | 5,20        | 1,73                            | 89,0              | 3735  |
| Agosto          | 15,73             | 12,86            | 11,06                 | 27,9        | 6,20        | 2,11                            | 74,5              | 3386  |
| Setembro        | 14,62             | 12,06            | 10,39                 | 29,6        | 5,10        | 2,51                            | 115,4             | 3950  |
| Outubro         | 17,60             | 15,40            | 14,33                 | 31,0        | 9,00        | 2,46                            | 134,2             | 3998  |
| Novembr         | 18,01             | 15,79            | 14,69                 | 28,0        | 12,70       | 2,56                            | 123,8             | 4990  |
| Dezembr         | 19,41             | 16,22            | 14,62                 | 32,2        | 10,20       | 2,22                            | 150,1             | 5906  |
| Anual           | 17,29             | 14,59            | 13,08                 | 28,5        | 8,72        | 2,17                            | 1408,0            | 4142  |

Nota: Maiores valores mensais sublinhados e os menores valores em negrito.

Fonte: EnergyPlus (TRY) e Organização Meteorológica Mundial.

### 3.1.9 Definição de edifício de energia zero adotada.

O método adota a definição local de energia zero. Todos os usos finais de energia são contabilizados no balanço e supridos por fonte elétrica, incluindo, aquecimento de água, confecção de alimentos e consumo de operação de brises e áreas transparentes. O período do balanço é anual e definido pela subtração do consumo energético à geração fotovoltaica, com o sistema implantado na área de cobertura do edifício e interligado com a rede, sem sistema de armazenamento de energia. Deve garantir condições de conforto térmico e grau elevado de eficiência energética.

## 3.2 PRIMEIRA ETAPA: ESTUDO PILOTO

### 3.2.1 Sistemas para conforto térmico simulados

A primeira etapa do trabalho simula dois sistemas distintos de sistemas artificiais de condicionamento. Os sistemas artificiais de condicionamento são simulados variando diferentes parâmetros do envelope para as Belém e Curitiba, sendo essas variações iguais para ambas as cidades. Os sistemas artificiais de condicionamento simulados são:

- Ventilação natural automática;
- Climatização artificial.

### 3.2.2 Sistema de ventilação natural automática

O sistema de ventilação natural automática abre e fecha automaticamente as áreas transparentes (todas as janelas e portas), através de um sistema eletromecânico, para maximizar os efeitos da ventilação natural.

O sistema de ventilação natural automática representa o máximo teórico para aproveitamento da ventilação natural e representa uma opção alternativa de baixo consumo energético a sistemas de condicionamento de ar convencionais. O modo de operação das janelas segue a seguinte regra:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{interna} > T_{externa} \\ T_{interna} > 25^{\circ}C \end{array} \right.$$

O valor de 25°C foi definido arbitrariamente, buscando um compromisso entre as condições de calor em Belém, onde valores mais altos de temperatura são aceitáveis e preservar a maximização de calor para Curitiba. A simulação do sistema de ventilação natural automática assume que todas as áreas transparentes abrem 100 % da sua área. Assumir que as áreas transparentes podem abrir 100% da sua área visa maximizar as taxas de renovação de ar ao máximo, dentro da geometria do modelo de simulação. A infiltração de ar tem o valor máximo de 0,6 ach (*air change per hour*), de acordo com a norma *Passivhaus* dependendo a taxa de renovação do ar da velocidade do vento definida nos arquivos climáticos de cada cidade. Saliente-se que a configuração espacial do modelo de simulação, com a sua planta livre, maximiza a ventilação cruzada, favorecendo o movimento do ar.

A temperatura interna e umidade relativas variam de acordo com a interação da área interna com o meio externo e o conforto térmico é avaliado pelo modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2010).

### 3.2.3 Sistema de climatização artificial

A climatização artificial é um sistema de condicionamento de ar convencional. A climatização ocorre através de um ciclo termo dinâmico alimentado a energia elétrica. A maioria dos sistemas convencionais de condicionamento de ar opera com um volume único de circulação de refrigerante. Esse volume corresponde à capacidade máxima de operação do sistema. Quando a temperatura interna da área condicionada é inferior ao limite inferior do intervalo de temperatura de controle definida, estes sistemas interrompem a circulação do refrigerante e desligam. Quando a temperatura interna atinge limite superior do intervalo de temperatura de controle definida, estes sistemas religam e voltam a operar com o volume máximo de refrigerante. Este modo de operação provoca ciclos sucessivos de desligamento e religamento destes sistemas. A sucessão destes ciclos eleva o consumo energético quando comparados com a circulação contínua do refrigerante. Os sistemas operam a eficiência máxima quando o sistema trabalha em regime permanente com a circulação constante do refrigerante. O sistema fluxo variável de refrigerante é um sistema convencional de condicionamento de ar com a particularidade de poder variar o volume de refrigerante em circulação. A variação do volume de refrigerante em circulação evita os ciclos de desligamento e religamento do sistema. Ao evitar estes ciclos, o fluxo variável de refrigerante consome menos energia que um sistema convencional de condicionamento de ar. Dessa forma, o sistema fluxo variável de refrigerante representa a formulação de um sistema convencional de condicionamento de ar, com menor consumo energético disponível comercialmente.

Os coeficientes de desempenho (*Coefficient of performance COP*) são de 3,2917 para refrigeração e 3,5484 para o aquecimento, assim como as curvas de desempenho são retiradas do do *example file* do EnergyPlus *Variable Refrigerant Flow\_5Zone* utilizado como base para as simulações. O intervalo de temperatura de controle da climatização artificial é definido entre 21,1°C e 23,9°C. Estes valores visam manter a um intervalo de temperatura de controle de 21°C a 24°C, visando uma operação estática da climatização artificial. Este intervalo de

temperatura de controle é o valor padrão do *example file* do EnergyPlus *Variable Refrigerant Flow\_5Zone*.

O modelo opera fechado durante todo o ano. A infiltração de ar tem o valor máximo de 0,6 ach, de acordo com um edifício baseado na norma *Passivhaus*. É feita uma renovação de ar de 30 m<sup>3</sup>/h por pessoa em ambas as zonas. Esta renovação visa manter a qualidade interna do ar dada a baixa infiltração de ar. A climatização artificial está sempre ligada, operando 24 horas.

### 3.2.4 Opções de sombreamento

Cada sistema de condicionamento de ar é simulado com três opções de sombreamento distintos. As opções são:

- Sombreamento nulo;
- Sombreamento parcial;
- Sombreamento completo.

As três opções de sombreamento permitem comparar o impacto de diferentes sombreamentos no desempenho térmico e consumo energético. A Figura 39 ilustra as três opções de sombreamento, onde a superfícies a preto representam sombreamento.



Figura 39: Ilustração das três opções de sombreamento. Fonte: autor.

O sombreamento de áreas transparentes na primeira etapa é feito através de um artifício de simulação disponível no EnergyPlus: a opção *nosun*. A opção *nosun* consiste em desconsiderar a incidência de irradiação solar em superfícies opacas. Desta forma, permite simular um sombreamento ideal.

A opção *nosun* não está diretamente disponível para as áreas transparentes. No entanto, no EnergyPlus, uma área transparente tem de ser obrigatoriamente inserida em uma superfície opaca preexistente. Caso a opção *nosun* seja ativada em uma superfície opaca com uma área transparente inserida a incidência da irradiação solar é desconsiderada para a área transparente também. Dessa forma, para poder aplicar a opção *nosun* em áreas transparentes separadamente das áreas opacas, as paredes são seccionadas. Algumas seções de parede

têm a área mínima para conter uma área transparente. As outras seções contêm somente superfícies opacas.

A Figura 40 ilustra como a fachada sul foi seccionada.

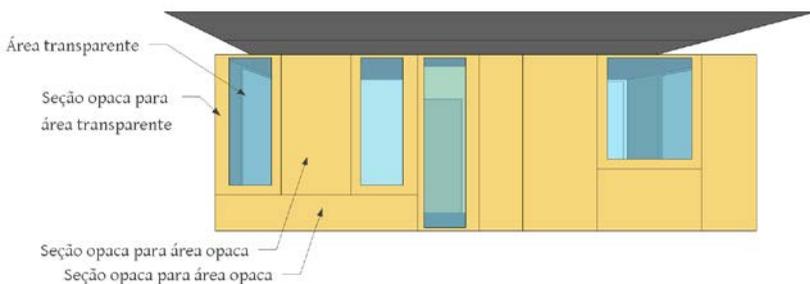


Figura 40: Ilustração das seções de parede na fachada sul. Fonte: autor.

As seções específicas de parede para áreas transparentes têm a área mínima possível para conterem a área transparente respectiva. A área de cada seção específica de parede é ligeiramente maior que a área transparente. No modelo geométrico de simulação as áreas transparentes referem-se unicamente à área de vidro. A esquadria é calculada à parte e não aparece na geometria. O EnergyPlus contabiliza a área adicional de esquadria e não permite que uma área transparente seja inserida em uma superfície opaca com área inferior à soma das áreas de vidro e esquadria. A Figura 40 representa a simulação da opção de sombreamento nulo.

Figura 41 ilustra a simulação da opção de sombreamento parcial na fachada sul.

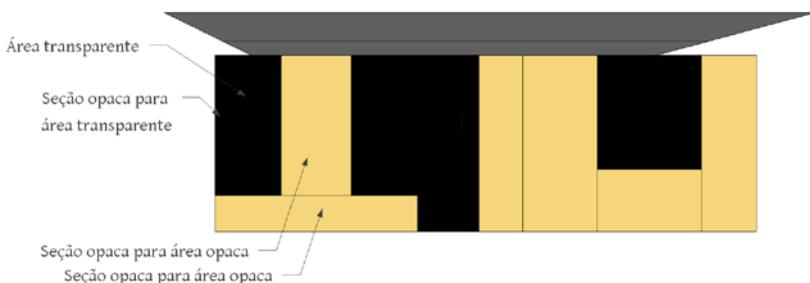


Figura 41: Ilustração de aplicação de opção *nosun* para simulação da opção de sombreamento parcial na fachada sul. Fonte: autor.

Finalmente, a Figura 42 mostra as diversas divisões de cada parede. As fachadas com mais áreas transparentes apresentam mais

seções. Algumas seções sem áreas transparente são dívidas em mais seções para garantir forma retangular para cada seção. A forma retangular para cada seção facilita a simulação e visa prevenir erros de simulação. Dessa forma, a fachada sul, com o maior número de áreas transparentes, apresenta o maior número de seções.

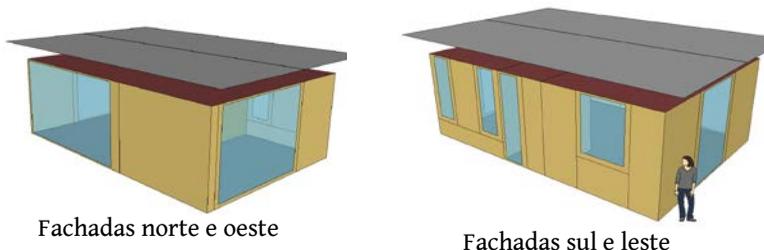


Figura 42: Representação das seções de parede no modelo de simulação.

Fonte: autor.

### 3.2.5 Níveis de transmitância térmica

Seis níveis de transmitância térmica são simulados. Os valores variam para cobertura, paredes e piso. A Tabela 19 resume os valores das transmitâncias térmicas de cada nível de isolamento térmico.

Tabela 19: Resumo das transmitâncias térmicas das superfícies dos diferentes níveis de envelope.

| Nível de transmitância térmica | Cobertura<br>[W/m <sup>2</sup> K] | Parede<br>[W/m <sup>2</sup> K] | Piso<br>[W/m <sup>2</sup> K] |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1                              | 0,10                              | 0,13                           | 0,11                         |
| 2                              | 0,14                              | 0,19                           | 0,16                         |
| 3                              | 0,24                              | 0,31                           | 0,26                         |
| 4                              | 0,84                              | 0,87                           | 0,81                         |
| 5                              | 1,13                              | 1,71                           | 0,90                         |
| 6                              | 1,86                              | 3,47                           | 1,31                         |

Fonte: autor.

O nível 1 de transmitância térmica (com valores de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente) é o mesmo utilizado para cobertura, parede e piso na Eko House. O cálculo da transmitância térmica de cobertura, parede e fachada é feito através das propriedades térmicas dos materiais utilizados na Eko House. Os níveis 2, 3 e 4 representam uma construção

simplificada da Eko House, com um sistema sanduíche composto por duas placas de OSB de 18 mm uma câmara interna preenchida com espessuras distintas de lã de vidro. Para cobertura parede e piso, o intervalo entre as de dois níveis sucessivos de transmitâncias térmicas é igual. Estes níveis foram definidos arbitrariamente, com o intuito de representarem transmitância térmicas reduzidas.

O nível 5 representa a mesmo sistema sanduíche com a diferença de a câmara interna ser preenchida com ar ao invés de lã de vidro. Neste caso, as transmitâncias térmicas resultam da eliminação da lã de vidro no interior dos painéis do envelope.

O nível 6 (com valores de  $1,86 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $3,47 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $1,31 \text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede, e piso, respectivamente) simula o desempenho de um envelope com uma só chapa de OSB. Casas de madeira são ainda relativamente comuns em habitações de baixa renda na região sul e na região norte.

O detalhe construtivo explica o fato de os pisos nos níveis 5 e 6 o piso apresentar maior resistência térmica que cobertura e parede. No nível 5, a parede é constituída por um sanduíche de OSB com uma camada de 60 mm no meio. A cobertura tem duas camadas adicionais para além do sanduíche de OSB: uma camada de ar e a telha zipada de alumínio. O piso no nível 5 também tem duas camadas adicionais: um piso de madeira e uma camada de ar.

O OSB não tem a dureza ou resistência ao punçamento adequadas a um piso. Por esse motivo, o piso de madeira utilizado na Eko House foi mantido. Adicionalmente, a madeira do piso interno não é aplicada diretamente sobre as chapas de OSB. Uma camada de ar adicional é necessária entre piso e OSB do piso. O piso de madeira e a camada de ar associada ao piso de madeira estão localizados por cima do sanduíche de OSB. A resistência térmica das réguas de madeira no contra piso foi desprezada.

A resistência térmica do piso de madeira é significativamente superior àquela da telha de alumínio. Dessa forma, o piso apresenta uma resistência térmica maior que a cobertura para o nível 5. O mesmo ocorre para o nível 6 (com valores de  $1,86 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $3,47 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $1,31 \text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede, e piso, respectivamente) com a diferença que o sanduíche formado por duas chapas de OSB com caixa de ar é substituído por uma única chapa eliminando a caixa de ar. As paredes internas com o mesmo isolamento da camada intermédia da camada interna de lã de rocha da parede externa.

Finalmente, para todos os níveis a resistência térmica da barreira de vapor é desconsiderada (a barreira de vapor é considerada somente na taxa de infiltração considerada que seria impossível sem ela). A composição de cada superfície para cada nível de transmitância térmica e respectivo cálculo é apresentada no apêndice A.

### 3.2.6 Análise de resultados da primeira etapa

A análise de resultados enfoca conforto térmico e consumo energético. A Tabela 20 apresenta os parâmetros e critérios de análise da primeira etapa.

Tabela 20: Parâmetros e critérios para análise de resultados da primeira etapa.

| Sistema para conforto térmico | Parâmetros de análise   | Critérios de análise   |
|-------------------------------|---|--|
| Ventilação natural automática | Soma mensal e anual graus horas de desconforto<br>Amplitude de graus hora | Menor e maior soma anual de graus horas de desconforto de calor e frio<br>Menor amplitude máxima |
| Climatização artificial       | Consumo elétrico  | Menor consumo elétrico anual   |

Fonte: autor.

O sistema de ventilação natural automática utiliza graus horas de desconforto térmico para avaliação dos resultados. Os graus horas de desconforto térmico são definidos a partir da norma ASHRAE 55 (2010). É utilizada a média corrente (*running mean*) calculada por o EnergyPlus, uma média aritmética simples, que é o método sugerido por a norma. Partindo da média corrente ( $M_c$ ) é definida a banda de conforto térmico de 80% de aceitabilidade de acordo com a ASHRAE 55 (2010).

A Equação 9 mostra como é definida a banda de conforto de 80%.

$$M_c - 3,5^\circ\text{C} < T_{80\%} < M_c + 3,5^\circ\text{C} \quad \text{Equação 9}$$

Os graus horas de desconforto de frio são calculados sempre que a temperatura operativa é inferior  $M_c - 3,5^\circ\text{C}$ . Analogamente, os graus horas de desconforto por calor são calculados sempre que a temperatura operativa é superior  $M_c + 3,5^\circ\text{C}$ .

Os graus horas de desconforto são analisados por soma anual e amplitude. A soma anual soma todos os graus hora ocorridos em um ano. Para Belém, somente a soma anual de graus hora de calor é apresentadas, visto os graus hora de frio serem virtualmente inexistentes. Para Curitiba, são apresentadas as somas anuais de graus hora de calor, de frio e a soma anual agregada (total) de graus hora de calor e frio. Visa-se identificar as menores e maiores somas anuais de graus hora, para Belém e Curitiba, com o intuito de quantificar a diferença máxima, nos resultados, entre os envelopes com melhor e pior desempenho térmico.

As somas de graus hora fornecem uma medida agregada. Indicam quantos graus hora ocorreram, mas não fornece indicação de quanto os mesmos se afastaram dos limites de conforto térmico. Trinta graus hora de desconforto por calor por mês podem significar três dias com temperatura acima do limite máximo de conforto em 10 graus ou que todo o dia do mês a temperatura ultrapassou o limite máximo de conforto em 1 grau. A amplitude dos graus horas mede quantos graus, um grau hora se afastou do limite de conforto, e registra a frequência que tal acontece. Para análise de amplitude de graus hora são analisados os casos com menor e maior soma anual de graus hora. São também analisados os envelopes que tiveram a menor e maior soma anual de graus hora com a opção de sombreamento oposta. Exemplificando, caso o melhor caso ocorra com sombreamento nulo, a amplitude de graus hora desse mesmo envelope com opção sombreamento completo é igualmente analisada. Este procedimento visa analisar melhor a relação entre amplitudes de graus hora, sombreamento e transmitância térmica. Estes Comm a com a avaliação de desempenho da climatização artificial utiliza somente o consumo energético, visto manter a temperatura dentro dos limites definidos, não se verificando graus hora de desconforto térmico.

São analisados os consumos de aquecimento e refrigeração e a soma total dos dois consumos. Entende-se por consumo de aquecimento e refrigeração os consumos energéticos do ciclo termodinâmico, mais o consumo energético dos ventiladores. Para Curitiba, os consumos energéticos de aquecimento, refrigeração e dos ventiladores, serão também serão analisados. Esta opção advém da maior complexidade de analisar um sistema com aquecimento e refrigeração.

A análise de resultados visa identificar o menor e maior consumo energético anual. Tal como para a ventilação natural automática, o intuito é quantificar a diferença máxima, nos resultados, entre os envelopes melhor e pior desempenho térmico.

Finalmente, os resultados de cada sistema são comparados entre Belém e Curitiba. Esta análise visa analisar como as diferenças climáticas interferem no conforto térmico ou consumo energético de sistemas de climatização em Belém e Curitiba

### 3.3 SEGUNDA ETAPA: ALTERAÇÃO DO ALGORITMO DE SOMBREAMENTO

#### 3.3.1 Descrição da alteração do sombreamento

A segunda etapa altera o algoritmo de sombreamento para as áreas transparentes para os casos da primeira etapa com melhores resultados. Para a ventilação natural automática, a menor soma anual de graus hora da primeira etapa é resimulada. Para a climatização artificial, o menor consumo energético anual é resimulado. Em ambos os casos, são resimulados com um novo algoritmo de sombreamento.

A primeira etapa usa o objeto *nosun* para obter um sombreamento ideal. No entanto, o objeto *nosun* é limitado. Principalmente, para a simulação de áreas transparentes. Em climas com desconforto por frio, como no caso de Curitiba, ganhos de calor podem ser positivos. O objeto *nosun* simplesmente liga ou desliga a incidência de irradiação solar em uma superfície.

O EnergyPlus dispõe de objetos de simulação que permitem um controle do sombreamento mais sofisticado das áreas transparentes. Dessa forma, a segunda etapa utiliza brises para sombreamento das áreas transparentes. No entanto, o objeto *nosun* é mantido para a simulação do sombreamento das áreas opacas da fachada.

Os brises são simulados através de objeto do EnergyPlus *ShadingControl*. Este objeto permite controlar a ação de sistemas de sombreamento através de parâmetros pré-definidos.

O uso de brises nas áreas transparentes da fachada sul decorre da baixa latitude de Belém do Para (1° Sul). Por uma questão de coerência brises são também aplicados nas áreas transparentes aplicadas na fachada sul para as simulações em Curitiba.

O ângulo das lâminas dos brises é variável de acordo com parâmetros de controle *BlockBeamSolar* do objeto *ShadingControl*. A opção *BlockBeamSolar* varia o dinamicamente ângulo das lâminas para

garantir o sombreamento completo da área transparente. As lâminas têm refletância de 0,8 para ambas as faces

Para otimizar o sombreamento dois tipos de *brises* são usados: de lâminas horizontais e de lâminas verticais. Os *brises* de lâmina horizontal são utilizados nas áreas transparentes localizadas nas fachadas norte e sul. Os *brises* de lâmina vertical são utilizados nas áreas transparentes localizadas nas fachadas leste e oeste.

Os dados de simulação das lâminas dos brises horizontais podem ser vistos na Tabela 21, tal como introduzidos no EnergyPlus.

Tabela 21: Dados geométricos e térmicos dos brises horizontais.

---

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:BLIND  
=====

WindowMaterial:Blind,

BLIND WITH HIGH REFLECTIVITY SLATS, !- Name

Horizontal, !- Slat Orientation

0.025, !- Slat Width {m}

0.01875, !- Slat Separation {m}

0.005, !- Slat Thickness {m}

45.0, !- Slat Angle {deg}

0.9, !- Slat Conductivity {W/m-K}

0.0, !- Slat Beam Solar Transmittance

0.8, !- Front Side Slat Beam Solar Reflectance

0.8, !- Back Side Slat Beam Solar Reflectance

0.0, !- Slat Diffuse Solar Transmittance

0.8, !- Front Side Slat Diffuse Solar Reflectance

0.8, !- Back Side Slat Diffuse Solar Reflectance

0.0, !- Slat Beam Visible Transmittance

0.8, !- Front Side Slat Beam Visible Reflectance

0.8, !- Back Side Slat Beam Visible Reflectance

0.0, !- Slat Diffuse Visible Transmittance

0.8, !- Front Side Slat Diffuse Visible Reflectance

0.8, !- Back Side Slat Diffuse Visible Reflectance

0.0, !- Slat Infrared Hemispherical Transmittance

0.9, !- Front Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity

0.9, !- Back Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity

0.050, !- Blind to Glass Distance {m}

0.5, !- Blind Top Opening Multiplier

0.5, !- Blind Bottom Opening Multiplier

0.5, !- Blind Left Side Opening Multiplier

0.5, !- Blind Right Side Opening Multiplier

12.2, !- Minimum Slat Angle {deg}

167.8; !- Maximum Slat Angle {deg}

---

Fonte: autor.

Os dados de simulação das lâminas dos brises verticais podem ser vistos na Tabela 22, tal como introduzidos no EnergyPlus.

Tabela 22: Dados geométricos e térmicos dos brises verticais.

---

|   |  |
|---|--|
| WindowMaterial:Blind,                           |  |
| VERTICAL BLIND WITH HIGH REFLECTIVITY SLATS, !- | Name   |
| Vertical,                                       | !- Slat Orientation                                  |
| 0.025,  | !- Slat Width {m}                                    |
| 0.01875,  | !- Slat Separation {m}                               |
| 0.005,  | !- Slat Thickness {m}                                |
| 45.0,   | !- Slat Angle {deg}                                  |
| 0.9,  | !- Slat Conductivity {W/m-K}                         |
| 0.0,  | !- Slat Beam Solar Transmittance                     |
| 0.8,  | !- Front Side Slat Beam Solar Reflectance            |
| 0.8,  | !- Back Side Slat Beam Solar Reflectance             |
| 0.0,  | !- Slat Diffuse Solar Transmittance                  |
| 0.8,  | !- Front Side Slat Diffuse Solar Reflectance         |
| 0.8,  | !- Back Side Slat Diffuse Solar Reflectance          |
| 0.0,  | !- Slat Beam Visible Transmittance                   |
| 0.8,  | !- Front Side Slat Beam Visible Reflectance          |
| 0.8,  | !- Back Side Slat Beam Visible Reflectance           |
| 0.0,  | !- Slat Diffuse Visible Transmittance                |
| 0.8,  | !- Front Side Slat Diffuse Visible Reflectance       |
| 0.8,  | !- Back Side Slat Diffuse Visible Reflectance        |
| 0.0,  | !- Slat Infrared Hemispherical Transmittance         |
| 0.9,  | !- Front Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity |
| 0.9,  | !- Back Side Slat Infrared Hemispherical Emissivity  |
| 0.050,  | !- Blind to Glass Distance {m}                       |
| 0.5,  | !- Blind Top Opening Multiplier                      |
| 0.5,  | !- Blind Bottom Opening Multiplier                   |
| 0.5,  | !- Blind Left Side Opening Multiplier                |
| 0.5,  | !- Blind Right Side Opening Multiplier               |
| 12.2,   | !- Minimum Slat Angle {deg}                          |
| 167.8;  | !- Maximum Slat Angle {deg}                          |

---

Fonte: autor.

### 3.3.2 Alteração do sombreamento: ventilação natural automática

Para o sistema de condicionamento artificial de ar ventilação natural automática, a opção de controle do sombreamento é *OnIfHighOutdoorAirTemperature*. Esta opção ativa os brises para sombreamento quando a temperatura externa do ar atinge o ultrapassa o valor pré-definido. Os valores de controle variam para a cidade e por mês. O valor específico para cada mês é definido por temperatura de conforto adaptativo de acordo com a ASHRAE 55 2010.

Para cada valor mensal de temperatura de controle dos brises são subtraídos, dois graus e quatro graus Celsius. A Tabela 23 apresenta os parâmetros de controle por mês para Belém. As temperaturas são utilizadas para criar dois objetos *compact schedules* para controle do sistema de sombreamento.

Tabela 23: Temperaturas mensais de controle de sombreamento para Belém.

| Mês       | Temperatura de conforto adaptativo ASHRAE 55 [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises -2 °C [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises -4 °C [°C] |
|-----------|---|--|--|
| Janeiro   | 24,26   | 22,26  | 20,26  |
| Fevereiro | 25,40   | 23,40  | 21,40  |
| Março     | 25,96   | 23,96  | 21,96  |
| Abril     | 26,05   | 24,05  | 22,05  |
| Mai       | 26,12   | 24,12  | 22,12  |
| Junho     | 26,19   | 24,19  | 22,19  |
| Julho     | 26,20   | 24,20  | 22,20  |
| Agosto    | 26,26   | 24,26  | 22,26  |
| Setembro  | 26,30   | 24,30  | 22,30  |
| Outubro   | 26,34   | 24,34  | 22,34  |
| Novembro  | 26,34   | 24,34  | 22,34  |
| Dezembro  | 26,25   | 24,25  | 22,25  |

Fonte: autor.

A Tabela 24 apresenta os valores de sombreamento para Curitiba.

Tabela 24: Temperaturas mensais de controle de sombreamento para Curitiba.

| Mês       | Temperatura de conforto adaptativo<br>ASHRAE 55 [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises<br>-2 °C [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises<br>-4 °C [°C] |
|-----------|--|---|---|
| Janeiro   | 22,61  | 20,61   | 18,61   |
| Fevereiro | 23,48  | 21,48   | 19,48   |
| Março     | 23,92  | 21,92   | 19,92   |
| Abril     | 23,69  | 21,69   | 19,69   |
| Maiο      | 23,04  | 21,04   | 19,04   |
| Junho     | 22,60  | 20,60   | 18,60   |
| Julho     | 22,38  | 20,38   | 18,38   |
| Agosto    | 22,56  | 20,56   | 18,56   |
| Setembro  | 22,59  | 20,59   | 18,59   |
| Outubro   | 22,65  | 20,65   | 18,65   |
| Novembro  | 23,15  | 21,15   | 19,15   |
| Dezembro  | 23,41  | 21,41   | 19,41   |

Fonte: autor.

O valor para abertura das áreas transparentes é de 25 °C para ambas as cidades. Este é o mesmo valor utilizado na primeira etapa. Este valor é mantido para poder comparar os efeitos da alteração de algoritmo de sombreamento no desempenho em graus hora de desconforto.

### 3.3.3 Alteração do sombreamento: climatização artificial

Para o sistema climatização artificial opção de controle do sombreamento é *OnIfHighZoneAirTemperature*. Esta opção ativa os *brises* para sombreamento, quando a temperatura interna do ar na zona condicionada atinge um valor pré-definido. Um valor de temperatura interna para controle dos brises é simulado: 21°C. Este valor é escolhido por ser o limite inferior da banda de controle da temperatura do Fluxo variável de refrigerante.

### 3.3.4 Análise de resultados da segunda etapa

As análises enfocam conforto térmico e consumo energético, abrangendo o período mensal e anual. Os resultados da segunda etapa são comparados com da primeira etapa. A Tabela 25 apresenta os parâmetros e critérios de análise de resultados.

Tabela 25: Parâmetros e critérios para análise de resultados da segunda etapa.

| Sistema para conforto térmico | Parâmetros de análise                          | Critério de melhor desempenho                                  |
|-------------------------------|--|--|
| Ventilação natural automática | Soma mensal e anual graus horas de desconforto | Menor soma anual de graus horas de desconforto de calor e frio |
| Climatização artificial       | Consumo elétrico                               | Menor consumo elétrico anual                                   |

Fonte: autor.

Para a ventilação natural automática, somente a menor soma anual de graus hora, entre os dois casos resimulados na segunda etapa, é objeto de análise. Os graus hora são calculados de acordo como o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2010), tal como na primeira etapa. Para Belém, somente a soma anual de graus hora de calor é analisada. Para Curitiba, a soma anual de graus hora de calor, de frio e a soma agregada de graus hora de calor e frio. As comparações são feitas para a mesma cidade e entre os resultados de Belém e Curitiba.

Para a climatização artificial, a análise é feita através da comparação dos consumos energéticos mensal e anual. Por energia de climatização entende-se a soma dos consumos energéticos em aquecimento, refrigeração e ventiladores. As comparações são feitas para a mesma cidade e entre os resultados de Belém e Curitiba.

### 3.4 TERCEIRA ETAPA: OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS PARA OBTENÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO

#### 3.4.1 Introdução

A terceira etapa visa à otimização do desempenho dos sistemas obtenção de conforto térmico. Três estratégias de otimização são testadas; uma estratégia para a ventilação natural automática e duas estratégias para fluxo variável de refrigerante.

A estratégia para a ventilação natural automática visa testar os efeitos no conforto térmico da operação adaptativa de áreas transparentes com um intervalo dinâmico, alterada mensalmente, através dos limites de conforto térmico definidos na norma ASHRAE 55. As estratégias são discriminadas na Tabela 26.

Tabela 26: Síntese das estratégias de otimização da terceira etapa.

| Sistema artificial de condicionamento de ar | Estratégia de otimização  |
|---|---|
| Ventilação natural automática               | Operação adaptativa de abertura das áreas transparentes (áreas de ventilação)                                       |
| Climatização artificial                     | -Climatização artificial com recuperação de calor<br>-Operação adaptativa do sistema de climatização e sombreamento |

Fonte: autor.

#### 3.4.2 Estratégias de otimização do sistema de ventilação natural automática

A estratégia de otimização para a ventilação natural automática consiste na operação da abertura das áreas transparentes através dos limites da banda operativa. A banda operativa das áreas transparentes é definida através da ASHRAE 55 2010. O sistema de ventilação natural automática é otimizado através da alteração das temperaturas de controle para abertura das áreas transparentes. O controle das áreas transparentes é feito através de um intervalo dinâmico.

A Tabela 27 apresenta os valores dos intervalos dinâmicos para Belém.

Tabela 27: Temperaturas de controle de abertura das áreas transparentes para Belém.

| Mês       | Temperatura de referência de conforto adaptativo ASHRAE 55 [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises -2,5 °C [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises -3,5°C [°C] |
|-----------|---|--|---|
| Janeiro   | 24,26   | 21,76  | 20,76   |
| Fevereiro | 25,40   | 22,90  | 21,90   |
| Março     | 25,96   | 23,46  | 22,46   |
| Abril     | 26,05   | 23,55  | 22,55   |
| Mai       | 26,12   | 23,62  | 22,62   |
| Junho     | 26,19   | 23,69  | 22,69   |
| Julho     | 26,20   | 23,70  | 22,70   |
| Agosto    | 26,26   | 23,76  | 22,76   |
| Setembro  | 26,30   | 23,80  | 22,80   |
| Outubro   | 26,34   | 23,84  | 22,84   |
| Novembro  | 26,34   | 23,84  | 22,84   |
| Dezembro  | 26,25   | 23,75  | 22,75   |

Fonte: autor.

A Tabela 28 apresenta os valores dos intervalos dinâmicos para Curitiba. Neste caso, os valores de temperatura de controle são superiores a temperatura de referência com o objetivo de conservar o maior calor possível dentro dos limites do conforto térmico.

Tabela 28: Temperaturas de controle de abertura das áreas transparentes para Curitiba.

| Mês       | Temperatura de referência conforto adaptativo ASHRAE 55 [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises +2,5°C [°C] | Temperatura de controle para ativação de brises +3,5°C [°C] |
|-----------|--|---|---|
| Janeiro   | 22,61  | 25,11   | 26,11   |
| Fevereiro | 23,48  | 25,98   | 26,98   |
| Março     | 23,92  | 26,42   | 27,42   |
| Abril     | 23,69  | 26,19   | 27,19   |
| Maio      | 23,04  | 25,54   | 26,54   |
| Junho     | 22,60  | 25,10   | 26,10   |
| Julho     | 22,38  | 24,88   | 25,88   |
| Agosto    | 22,56  | 25,06   | 26,06   |
| Setembro  | 22,59  | 25,09   | 26,09   |
| Outubro   | 22,65  | 25,15   | 26,15   |
| Novembro  | 23,15  | 25,65   | 26,65   |
| Dezembro  | 23,41  | 25,91   | 26,91   |

Fonte: autor.

Cada um dos quatro intervalos dinâmicos tem doze valores para abertura das áreas transparentes. Um valor de temperatura para cada mês do ano. Os valores são determinados através da ASHRAE 55 2010. As bandas de conforto são definidas partindo da média mensal das temperaturas médias correntes de conforto diário. Partindo dessa temperatura são subtraídos 2,5°C e 3,5 °C. O resultado das subtrações determina a temperatura de abertura das janelas. Os valores de 2,5 °C e 3,5 °C determinam os limites mínimos de conforto térmico para os intervalos de 90% e 80%.

### 3.4.3 Estratégias de otimização do sistema climatização artificial

As estratégias para otimização para a climatização artificial são:

- Adoção de operação adaptativa;
- Adição de recuperação de calor.

A adoção da operação adaptativa consiste na substituição do intervalo de temperatura de controle de 21°C a 24°C por um intervalo de temperatura de controle variável. Ao invés do sistema variável de refrigerante manter a temperatura do ar interno entre 21°C e 24°C, os valores mínimos e máximos variam diariamente sendo definidos partir do modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 2010.

A ASHRAE 55 2010 define um valor horário de temperatura através de uma média corrente das temperaturas anteriores. O valor diário de temperatura é utilizado para definir duas bandas de conforto. As bandas de conforto são definidas através da soma dos valores de  $\pm 2,5$  °C e  $\pm 3,5$  °C ao valor horário de referência. Segundo a ASHRAE as temperaturas dentro do intervalo  $\pm 2,5$  °C definem uma zona de conforto térmico com 90% de aceitabilidade. Por sua vez, as temperaturas dentro do intervalo  $\pm 3,5$  °C definem uma zona de conforto térmico com 80% de aceitabilidade.

Dessa forma, a estratégia de otimização para a climatização artificial consiste na utilização dos valores extremos dos intervalos de 90% e 80% de aceitabilidade como limites superiores e inferiores do intervalo de temperatura de controle do sistema.

A mudança para um intervalo de temperatura de controle adaptativa leva a alteração do controle dos brises. Os valores de temperatura de 21 °C e 24 °C, utilizados na segunda etapa para controle dos brises para o fluxo variável de refrigerante, são alterados para bandas de controle adaptativas. A Tabela 23 apresenta os parâmetros de controle por mês para Belém e a Tabela 24 para Curitiba.

O cálculo dos valores de referência horário é pedido como relatório ao EnergyPlus. Partindo do valor definido por o relatório, são calculados em planilha de cálculo os limites superiores e inferiores dos intervalos para 80%. Estes valores são calculados para as cidades de Belém e Curitiba. Determinados os valores superiores e inferiores dos quatro intervalos, são criados dois objetos *Schedule:File* para controle do sistema.

A outra estratégia de otimização do sistema climatização artificial, consiste na adição de recuperação de calor sensível e latente (*Energy recovery ventilation*), testando assim os efeitos do paradigma superisolado. A aplicação da recuperação de calor sensível e latente, complementada por isolamento térmico elevado, nível reduzido de infiltração e taxa reduzida de renovação de ar constitui o paradigma de climatização superisolado. Esta simulação visa analisar o seu desempenho nas condições climáticas brasileiras.

A recuperação de calor sensível e latente distingue-se da recuperação de calor sensível (*heat ventilation recovery*) por recuperar calor latente além do calor sensível. Dessa forma, o sistema de recuperação de calor sensível e latente é composto de um trocador de calor sensível e latente e duas ventiladores. O trocador de calor sensível e latente promove a troca de calor e umidade entre o ar de entrada e saída. Os dois ventiladores promovem o movimento o ar externo e interno no edifício. Um ventilador promove a entrada do ar externo no interior do edifício. A outro ventilador, a saída de parcela do ar interno do edifício para o exterior. A recuperação de calor sensível e latente funciona em conjunto com o fluido de refrigerante variável visando à redução do consumo em aquecimento e em refrigeração.

O funcionamento conjunto da recuperação de calor sensível e latente com o fluido de refrigerante variável é feito em paralelo. Dessa forma, a renovação de ar é feita através de recuperação de calor sensível e latente, enquanto a entrada de ar externo no fluido de refrigerante variável é reduzida a zero. O sistema fluido de refrigerante variável concentra-se a climatizar o ar interno. Esta é a única opção disponível no EnergyPlus que permite a operação conjunto dos dois sistemas. Esta configuração apresenta, no entanto, a limitação de aumentar o número de ventiladores.

Para testar os efeitos no consumo elétrico na climatização decorrentes da adição de recuperação de calor sensível e latente, o modelo fluido de refrigerante variável da segunda etapa é utilizado como base para novas simulações. Estas novas simulações combinam diferentes taxas de renovação mecânica e infiltração de ar, para testar os efeitos das diferentes combinações no consumo energético.

Por consumo agregado entende-se a soma dos consumos elétricos dos sistemas fluido de refrigerante variável e recuperação de calor sensível e latente. As variações das taxas partem do valor 0,6 ach, limite máximo da norma *Passivhaus*. Este valor de 0,6 ach é duplicado

e triplicado resultando nos valores de 1,2 e 1,8 ach. O valor de 1,2 ach está perto do limite da norma canadense R2000 (1,5 ach) e o valor 1,8 ultrapassa o máximo estabelecido na R2000. Dessa forma, estes três valores permitem testar as duas normas mais utilizadas baseadas no paradigma superisolado. A Tabela 29 discrimina as diferentes simulações a serem feitas. Estas simulações são feitas para Belém e Curitiba.

Tabela 29: Discriminação das taxas de renovação do ar mecânica e de infiltração simuladas.

| Taxa de renovação mecânica do ar externo | 0,6 [ach] | 1,2 [ach] | 1,8 [ach] |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Taxa de infiltração                      |           |           |           |
| 0,6 [ach]                                | X         | X         | X         |
| 1,2 [ach]                                |           | X         |           |
| 1,8 [ach]                                |           |           | X         |

Fonte: autor.

De entre as simulações apresentadas na Tabela 29, a simulação com menor consumo energético será objeto de uma análise discriminando os consumos energéticos por unidades condicionadoras, ventiladores e recuperadores de calor, com o objetivo de analisar qual a contribuição de cada um destes itens no consumo energético de climatização.

De entre as simulações apresentadas na Tabela 29, a simulação com menor consumo energético será resimulada. Admitindo um valor de potencial máxima do recuperador de calor sensível e latente de 5 W, valor dez vezes menor que o valor padrão (*default*) do EnergyPlus de 50 W. Esta simulação visa simular futuros desenvolvimentos tecnológicos que permitissem reduzir a demanda energética do recuperador de calor sensível e latente em uma ordem de magnitude. Esta simulação é feita para Belém e Curitiba.

A outra simulação aplica à simulação de menor consumo selecionada na segunda etapa, uma redução de 15% ao valor de consumo energético anual, segundo a melhor prática de acordo com Treado e Liu (2013). Esta simulação é feita para Belém e Curitiba.

Dessa forma, são realizadas no total sete simulações por cidade (as cinco simulações discriminadas na Tabela 29, a resimulação reduzindo a potência do recuperador de calor sensível e latente para 5 W e a redução de 15% no valor de consumo energético) perfazendo

um total de quatorze simulações. Segue-se uma discriminação dos parâmetros de simulação.

### 3.4.4 Parâmetros para a simulação de recuperação de calor sensível e latente

A Figura 43 apresenta um esquema de um sistema de recuperação de calor sensível e latente da forma que é modelado no EnergyPlus.

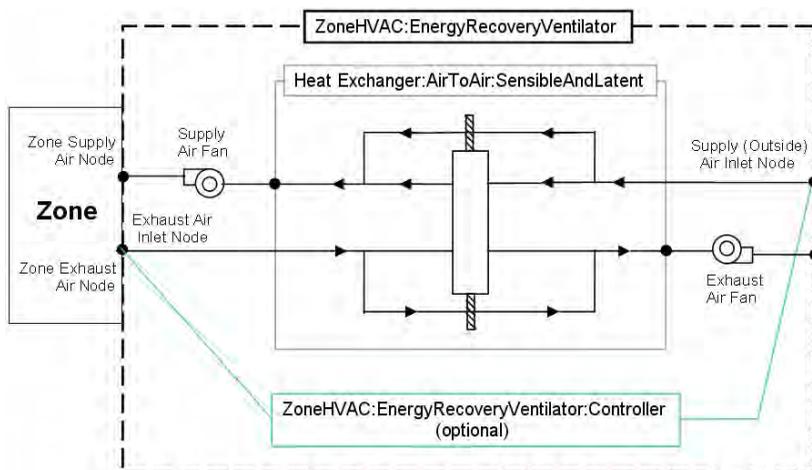


Figura 43: Esquema do sistema de recuperação de calor sensível e latente.

Fonte: EnergyPlus (2013).

Assim, o objeto *HeatExchanger:AirToAir:EnergyRecoveryVentilator* modela a recuperação de energia e duas ventiladores são simuladas por objetos *Fan:OnOff*. A estes objetos são adicionados mais dois objetos para entrada de parâmetros de controle: *ZoneHvac:EnergyRecoveryVentilator* e *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator:Controller*. A definição das taxas de renovação de ar dos ventiladores de entrada e saída do ar é feito através do objeto *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator*. O objeto *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator:Controller* define os valores de umidade dentro das zonas climatizadas. Cada uma das duas zonas climatizadas do modelo de simulação é dotada um destes conjuntos de objetos (um recuperador de energia, duas ventiladores mais dois objetos de controle) para modelar um recuperador de calor sensível e latente.

Adicionalmente, são necessários os seguintes objetos auxiliares adicionais *ZoneHVAC:EquipmentConnections*, *ZoneHVAC:EquipmentList*, *OutdoorAir:NodeList* e *NodeList* que definem a topologia das ligações entre os elementos do sistema.

O objeto do EnergyPlus *HeatExchanger:AirToAir:SensibleAndLatent* simula o desempenho de um recuperador de calor sensível e latente. São definidos dois objetos, um por cada zona térmica.

A Tabela 30 apresenta os parâmetros do objeto *HeatExchanger:AirToAir:SensibleAndLatent* para a zona 1.

Tabela 30: Parâmetros para o recuperador de calor sensível e latente para a zona térmica 1

---

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS:
HEATEXCHANGER:AIRTOAIR:SENSIBLEANDLATENT =====

HeatExchanger:AirToAir:SensibleAndLatent,
  OA Heat Recovery 1,  !- Name
  FanAndCoilAvailSched, !- Availability Schedule Name
  autosize,          !- Nominal Supply Air Flow Rate {m3/s}
  0.76,              !- Sensible Effectiveness at 100% Heating Air Flow
  {dimensionless}
  0.68,              !- Latent Effectiveness at 100% Heating Air Flow
  {dimensionless}
  0.81,              !- Sensible Effectiveness at 75% Heating Air Flow
  {dimensionless}
  0.73,              !- Latent Effectiveness at 75% Heating Air Flow
  {dimensionless}
  0.76,              !- Sensible Effectiveness at 100% Cooling Air Flow
  {dimensionless}
  0.68,              !- Latent Effectiveness at 100% Cooling Air Flow
  {dimensionless}
  0.81,              !- Sensible Effectiveness at 75% Cooling Air Flow
  {dimensionless}
  0.73,              !- Latent Effectiveness at 75% Cooling Air Flow
  {dimensionless}
  EVR-no1,          !- Supply Air Inlet Node Name
  EVR-no2,          !- Supply Air Outlet Node Name
  EVR-no4,          !- Exhaust Air Inlet Node Name
  EVR-no5,          !- Exhaust Air Outlet Node Name
  50.0,             !- Nominal Electric Power {W}
  Yes,              !- Supply Air Outlet Temperature Control
  Rotary,           !- Heat Exchanger Type
  MinimumExhaustTemperature, !- Frost Control Type
  1.7,              !- Threshold Temperature {C}
  ,                 !- Initial Defrost Time Fraction {dimensionless}
  ,                 !- Rate of Defrost Time Fraction Increase {1/K}
  Yes;              !- Economizer Lockout

```

---

Fonte: autor.

A Tabela 31 apresenta os parâmetros do objeto *HeatExchanger:AirToAir:SensibleAndLatent* para a zona 2.

Tabela 31: Parâmetros para o recuperador de calor sensível e latente para a zona térmica 2

---

|  |  |
|--|--|
| !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS:<br>HEATEXCHANGER:AIRTOAIR:SENSIBLEANDLATENT ===== |  |
| HeatExchanger:AirToAir:SensibleAndLatent,  |  |
| OA Heat Recovery 2,  | !- Name  |
| FanAndCoilAvailSched,  | !- Availability Schedule Name                      |
| autosize,  | !- Nominal Supply Air Flow Rate {m3/s}             |
| 0.76,  | !- Sensible Effectiveness at 100% Heating Air Flow |
| {dimensionless}  |  |
| 0.68,  | !- Latent Effectiveness at 100% Heating Air Flow   |
| {dimensionless}  |  |
| 0.81,  | !- Sensible Effectiveness at 75% Heating Air Flow  |
| {dimensionless}  |  |
| 0.73,  | !- Latent Effectiveness at 75% Heating Air Flow    |
| {dimensionless}  |  |
| 0.76,  | !- Sensible Effectiveness at 100% Cooling Air Flow |
| {dimensionless}  |  |
| 0.68,  | !- Latent Effectiveness at 100% Cooling Air Flow   |
| {dimensionless}  |  |
| 0.81,  | !- Sensible Effectiveness at 75% Cooling Air Flow  |
| {dimensionless}  |  |
| 0.73,  | !- Latent Effectiveness at 75% Cooling Air Flow    |
| {dimensionless}  |  |
| EVR-no1 2,   | !- Supply Air Inlet Node Name                      |
| EVR-no2 2,   | !- Supply Air Outlet Node Name                     |
| EVR-no4 2,   | !- Exhaust Air Inlet Node Name                     |
| EVR-no5 2,   | !- Exhaust Air Outlet Node Name                    |
| 50.0,  | !- Nominal Electric Power {W}                      |
| Yes,   | !- Supply Air Outlet Temperature Control           |
| Rotary,  | !- Heat Exchanger Type                             |
| MinimumExhaustTemperature,   | !- Frost Control Type                              |
| 1.7,   | !- Threshold Temperature {C}                       |
| ,  | !- Initial Defrost Time Fraction {dimensionless}   |
| ,  | !- Rate of Defrost Time Fraction Increase {1/K}    |
| Yes;   | !- Economizer Lockout                              |

---

Fonte: autor.

Os recuperadores de calor estão disponíveis 24 horas por dia. O fluxo é definido com a opção automático (*autosize*). Esta opção decorre da fixação de taxas constantes de renovação de ar conforme definido na Tabela 29. O valor de renovação de ar é definido em outro objeto, o *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator*. A eficiência da recuperação de calor para aquecimento e refrigeração mantém os valores padrão do objeto, assim como o valor de potência nominal. É definido o uso de ciclo economizador, para utilizar diretamente o ar exterior quando as temperaturas externas se encontram dentro da banda de temperatura desejada. Finalmente, o tipo de recuperador é uma roda entálpica, a opção padrão. Esta opção é utilizada, pois o EnergyPlus assume o mesmo consumo para as duas opções disponíveis de recuperado de calor sensível e latente.

A Tabela 32 apresenta os parâmetros do objeto *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator*. Os parâmetros deste objeto definem as condições gerais de operação da recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2. Especificamente, os parâmetros neste objeto definem o período de disponibilidade de operação da recuperação de calor sensível e latente (definido através do *FanAndCoilAvailSched* que determina disponibilidade 24 horas por dia). São igualmente determinadas as taxas de troca de ar dos ventiladores de entrada e saída de ar. O valor é definido automaticamente (através da opção *autosize*), dependente da taxa de ventilação por unidade de ar de pavimento para cada zona, definida igualmente neste objeto.

Tabela 32: Parâmetros de gerais de operação de recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2.

---

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS:
ZONEHVAC:ENERGYRECOVERYVENTILATOR =====

ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator,
  Stand Alone ERV 1,    !- Name
  FanAndCoilAvailSched, !- Availability Schedule Name
  OA Heat Recovery 1,  !- Heat Exchanger Name
  autosize,           !- Supply Air Flow Rate {m3/s}
  autosize,           !- Exhaust Air Flow Rate {m3/s}
  Stand Alone ERV Supply Fan, !- Supply Air Fan Name
  Stand Alone ERV Exhaust Fan, !- Exhaust Air Fan Name
  Zona1-ERV-CRTLer,   !- Controller Name
  0.0004499699;       !- Ventilation Rate per Unit Floor Area {m3/s-
m2}

ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator,
  Stand Alone ERV 2,    !- Name
  FanAndCoilAvailSched, !- Availability Schedule Name
  OA Heat Recovery 2,  !- Heat Exchanger Name
  autosize,           !- Supply Air Flow Rate {m3/s}
  autosize,           !- Exhaust Air Flow Rate {m3/s}
  Stand Alone ERV Supply Fan 2, !- Supply Air Fan Name
  Stand Alone ERV Exhaust Fan 2, !- Exhaust Air Fan Name
  Zona2-ERV-CRTLer,   !- Controller Name
  0.0004499008;       !- Ventilation Rate per Unit Floor Area {m3/s-
m2}

```

---

Fonte: autor.

A taxa de ventilação por unidade de ar de pavimento apresentada na Tabela 32 para as zonas térmicas 1 e 2, definida em  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ , correspondem às simulações com 0,6 ach. Outros valores de taxa de renovação de ar são simulados conforme definidos na Tabela 29, utilizado a unidade ach. No entanto, a taxa de ventilação por unidade de área de pavimento é definida em  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ .

A Tabela 33 apresenta conversão de ach para  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ . Os valores convertidos são utilizados para definir as taxas de renovação de ar no campo *VentilationRateperUnitFloorArea* dentro do objeto *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator*.

Tabela 33: Conversão de unidades para as taxas de renovação de ar simuladas na recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2.

| Taxa renovação de ar [ach] | Zona térmica 1 [ $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ] | Zona térmica 2 [ $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ ] |
|----------------------------|---|---|
| 0,6                        | 0,0004370102  | 0,0004499008  |
| 1,2                        | 0,00087402  | 0,000899802   |
| 1,8                        | 0,001311031   | 0,001349702   |

Fonte: autor.

A taxa de infiltração é definida através do objeto *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, na Tabela 34. As taxas máximas de infiltração utilizadas são as discriminadas anteriormente na Tabela 29.

Tabela 34: Parâmetros para simulação de infiltração.

---

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS:
ZONEINFILTRATION:DESIGNFLOWRATE =====

ZoneInfiltration:DesignFlowRate,
  OS:ThermalZone 1 Infil 1,!- Name
  OS:ThermalZone 1,    !- Zone or ZoneList Name
  INFIL-SCH,          !- Schedule Name
  AirChanges/Hour,    !- Design Flow Rate Calculation Method
  ,                   !- Design Flow Rate {m3/s}
  ,                   !- Flow per Zone Floor Area {m3/s-m2}
  ,                   !- Flow per Exterior Surface Area {m3/s-m2}
  1.8,                !- Air Changes per Hour {1/hr}
  0,                  !- Constant Term Coefficient
  0,                  !- Temperature Term Coefficient
  0.2237,             !- Velocity Term Coefficient
  0;                  !- Velocity Squared Term Coefficient

ZoneInfiltration:DesignFlowRate,
  OS:ThermalZone 2 Infil 1,!- Name
  OS:ThermalZone 2,    !- Zone or ZoneList Name
  INFIL-SCH,          !- Schedule Name
  AirChanges/Hour,    !- Design Flow Rate Calculation Method
  ,                   !- Design Flow Rate {m3/s}
  ,                   !- Flow per Zone Floor Area {m3/s-m2}
  ,                   !- Flow per Exterior Surface Area {m3/s-m2}
  1.8,                !- Air Changes per Hour {1/hr}
  0,                  !- Constant Term Coefficient
  0,                  !- Temperature Term Coefficient
  0.2237,             !- Velocity Term Coefficient
  0;                  !- Velocity Squared Term Coefficient

```

---

Fonte: autor.

O desempenho do recuperador de calor sensível e latente é influenciado por a velocidade do vento (ROULET e al., 2001). Um dos parâmetros afetados por a velocidade do vento é a taxa de infiltração. Por essa razão, foi acrescentado uma constante com valor de 0,2237 no campo *VelocityTermCoefficient*, com intuito de contabilizar o efeito da variação da velocidade do vento na recuperação de calor. O valor da

constante 0,2237 é retirado do valor padrão (*default*) presente no arquivo de exemplo (*exemple file*) do EnergyPlus para recuperação de calor sensível e latente.

O objeto *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator:Controlle* define a intervalo de temperatura de controle da recuperação de calor sensível e latente (21,1 °C a 23,9 C). Outras opções estão disponíveis para controle de umidade que não são utilizadas para melhor comparação de resultados com o fluido de refrigerante variável das primeiras e segundas etapas que não dispõem de controle de umidade.

A Tabela 35 mostra os parâmetros utilizados no objeto *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator:Controller*. Todas as simulações utilizam os parâmetros definidos na Tabela 35.

Tabela 35: Parâmetros utilizados no objeto *EnergyRecovery:Controller*.

---

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS:
ZONEHVAC:ENERGYRECOVERYVENTILATOR:CONTROLLER =====
  Zona1-ERV-CRTER,    !- Name
  23.9,                !- Temperature High Limit {C}
  21.1,                !- Temperature Low Limit {C}
  ,                    !- Enthalpy High Limit {J/kg}
  ,                    !- Dewpoint Temperature Limit {C}
  ,                    !- Electronic Enthalpy Limit Curve Name
  NoExhaustAirTemperatureLimit, !- Exhaust Air Temperature Limit
  NoExhaustAirEnthalpyLimit, !- Exhaust Air Enthalpy Limit
  Alwayson,           !- Time of Day Economizer Flow Control
  Schedule Name
  No,                 !- High Humidity Control Flag
  ,                   !- Humidistat Control Zone Name
  1,                  !- High Humidity Outdoor Air Flow Ratio
  ;                   !- Control High Indoor Humidity Based on Outdoor
  Humidity Ratio

ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator:Controller,
  Zona2-ERV-CRTER,    !- Name
  23.9,                !- Temperature High Limit {C}
  21.1,                !- Temperature Low Limit {C}
  ,                    !- Enthalpy High Limit {J/kg}
  ,                    !- Dewpoint Temperature Limit {C}
  ,                    !- Electronic Enthalpy Limit Curve Name
  NoExhaustAirTemperatureLimit, !- Exhaust Air Temperature Limit
  NoExhaustAirEnthalpyLimit, !- Exhaust Air Enthalpy Limit
  Alwayson ,          !- Time of Day Economizer Flow Control
  Schedule Name
  No,                 !- High Humidity Control Flag
  ,                   !- Humidistat Control Zone Name
  1,                  !- High Humidity Outdoor Air Flow Ratio
  ;                   !- Control High Indoor Humidity Based on Outdoor
  Humidity Ratio

```

---

Fonte: autor.

A Tabela 36 mostra os parâmetros de controle dos ventiladores da recuperação de calor sensível e latente.

Tabela 36: Parâmetros de controle dos ventiladores de recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2.

---

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: FAN:ONOFF =====  |                                |
| Fan:OnOff,                                      |                                |
| Stand Alone ERV Supply Fan 2,                   | !- Name                        |
| FanAndCoilAvailSched,                           | !- Availability Schedule Name  |
| 0.5,  | !- Fan Efficiency              |
| 75.0,   | !- Pressure Rise {Pa}          |
| autosize,                                       | !- Maximum Flow Rate {m3/s}    |
| 0.9,  | !- Motor Efficiency            |
| 1.0,  | !- Motor In Airstream Fraction |
| EVR-no2 2,                                      | !- Air Inlet Node Name         |
| EVR-no3 2;                                      | !- Air Outlet Node Name        |
| Fan:OnOff,                                      |                                |
| Stand Alone ERV Exhaust Fan 2, !- Name          |                                |
| FanAndCoilAvailSched,                           | !- Availability Schedule Name  |
| 0.5,  | !- Fan Efficiency              |
| 75.0,   | !- Pressure Rise {Pa}          |
| autosize,                                       | !- Maximum Flow Rate {m3/s}    |
| 0.9,  | !- Motor Efficiency            |
| 1.0,  | !- Motor In Airstream Fraction |
| EVR-no5 2,                                      | !- Air Inlet Node Name         |
| EVR-no6 2;                                      | !- Air Outlet Node Name        |
| Fan:OnOff,                                      |                                |
| Stand Alone ERV Supply Fan, !- Name             |                                |
| FanAndCoilAvailSched,                           | !- Availability Schedule Name  |
| 0.5,  | !- Fan Efficiency              |
| 75.0,   | !- Pressure Rise {Pa}          |
| autosize,                                       | !- Maximum Flow Rate {m3/s}    |
| 0.9,  | !- Motor Efficiency            |
| 1.0,  | !- Motor In Airstream Fraction |
| EVR-no2,  | !- Air Inlet Node Name         |
| EVR-no3;  | !- Air Outlet Node Name        |
| Fan:OnOff, Stand Alone ERV Exhaust Fan, !- Name |                                |
| FanAndCoilAvailSched,                           | !- Availability Schedule Name  |
| 0.5,  | !- Fan Efficiency              |
| 75.0,   | !- Pressure Rise {Pa}          |
| autosize,                                       | !- Maximum Flow Rate {m3/s}    |
| 0.9,  | !- Motor Efficiency            |
| 1.0,  | !- Motor In Airstream Fraction |
| EVR-no5,  | !- Air Inlet Node Name         |
| EVR-no6;  | !- Air Outlet Node Name        |

---

Fonte: autor.

Os valores padrão (*default*) do EnergyPlus são utilizados, com a exceção do Schedule de disponibilidade para operação dos ventiladores, *FanAndCoilAvailSched*, que determina uma disponibilidade de operação de 24h. O parâmetro *MaximumFlowRate* utiliza a opção de dimensionamento automático (*autosize*). Esta opção é decorrente da introdução de valores específicos de renovação de ar no parâmetro *VentilationRateperUnitFloorArea* do objeto *ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator* conforme definidos na Tabela 33.

A Tabela 37 define as listas de nós do sistema. Estas listas são parte da definição da topologia das ligações entre o recuperador de calor sensível e latente, os ventiladores e as entradas de ar externo, de entrada e saída de ar nas zonas condicionadas 1 e 2.

Tabela 37: Definição listas de conexão da recuperação de calor sensível e latente para as zonas térmicas 1 e 2.

---

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS:
ZONEHVAC:EQUIPMENTCONNECTIONS =====

ZoneHVAC:EquipmentConnections,
OS:ThermalZone 1,    !- Zone Name
Zone1Equipment,    !- Zone Conditioning Equipment List Name
Zone1Inlets,        !- Zone Air Inlet Node or NodeList Name
Zone1Exhausts,     !- Zone Air Exhaust Node or NodeList Name
Zone 1 Node,        !- Zone Air Node Name
Zone 1 Outlet Node; !- Zone Return Air Node Name

ZoneHVAC:EquipmentConnections,
OS:ThermalZone 2,    !- Zone Name
Zone2Equipment,     !- Zone Conditioning Equipment List Name
Zone2Inlets,        !- Zone Air Inlet Node or NodeList Name
Zone2Exhausts,     !- Zone Air Exhaust Node or NodeList Name
Zone 2 Node,        !- Zone Air Node Name
Zone 2 Outlet Node; !- Zone Return Air Node Name

```

---

Fonte: autor.

A Tabela 38 define a precedência na operação para aquecimento e refrigeração entre o fluido de refrigerante variável e a recuperação de calor sensível e latente.

Tabela 38: Definição de prioridade de atuação da recuperação de calor sensível e latente e do fluido de refrigerante variável.

---

|  |
|--|
| !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONEHVAC:EQUIPMENTLIST<br>=====     |
| ZoneHVAC:EquipmentList,  |
| Zone1Equipment,     !- Name  |
| ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator, !- Zone Equipment 1 Object      |
| Type   |
| Stand Alone ERV 1,   !- Zone Equipment 1 Name                      |
| 1,                 !- Zone Equipment 1 Cooling Sequence            |
| 1,                 !- Zone Equipment 1 Heating or No-Load Sequence |
| ZoneHVAC:TerminalUnit:VariableRefrigerantFlow, !- Zone Equipment   |
| 2 Object Type  |
| TU1,                !- Zone Equipment 2 Name                       |
| 2,                !- Zone Equipment 2 Cooling Sequence             |
| 2;                !- Zone Equipment 2 Heating or No-Load Sequence  |
| ZoneHVAC:EquipmentList,  |
| Zone2Equipment,     !- Name  |
| ZoneHVAC:EnergyRecoveryVentilator, !- Zone Equipment 1 Object      |
| Type   |
| Stand Alone ERV 2,   !- Zone Equipment 1 Name                      |
| 1,                 !- Zone Equipment 1 Cooling Sequence            |
| 1,                 !- Zone Equipment 1 Heating or No-Load Sequence |
| ZoneHVAC:TerminalUnit:VariableRefrigerantFlow, !- Zone Equipment   |
| 2 Object Type  |
| TU2,                !- Zone Equipment 2 Name                       |
| 2,                !- Zone Equipment 2 Cooling Sequence             |
| 2;                !- Zone Equipment 2 Heating or No-Load Sequence  |

---

Fonte: autor.

É definido que recuperação de calor sensível e latente tem prioridade para o aquecimento e refrigeração. Somente quando a recuperação de calor sensível e latente não atende a temperatura de controle o sistema fluido de refrigerante variável entra em operação. Esta opção garante menor consumo elétrico segundo testes feitos invertendo a precedência dos equipamentos.

A Tabela 39 define as listas de nós de entrada de ar externo nos sistemas de climatização. São apresentadas duas listas: uma para o fluido de refrigerante variável, outra para a recuperação de calor sensível e latente. Estas listas são independentes uma vez que os sistemas trabalham em paralelo.

Tabela 39: Definição de nós de entrada de ar do exterior nas zonas térmicas 1 e 2.

---

```
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTDOORAIR:NODELIST
=====
```

OutdoorAir:NodeList,

OutsideAirInletNodes, !- Node or NodeList Name 1

OutsideAirInletNodesEVR; !- Node or NodeList Name 2

---

Fonte: autor.

Finalmente, a Tabela 40, define os nós individuais constantes em cada lista de nós permitindo assim completar a definição da topologia dos sistemas de climatização. A Tabela 40 apresenta a topologia completa para o fluido de refrigerante variável e recuperação de calor sensível e latente.

Tabela 40: Definição de listas de nós dos sistemas de condicionamento para as zonas térmicas 1 e 2.

---

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: NODELIST =====

```

NodeList,
  OutsideAirInletNodes, !- Name
  no1,                   !- Node 1 Name
  no1-2,                 !- Node 2 Name
  MyVRFOANode;         !- Node 3 Name
NodeList,
  OutsideAirInletNodesEVR, !- Name
  EVR-no1,              !- Node 1 Name
  EVR-no1 2;           !- Node 2 Name
NodeList,
  Zone1Inlets,         !- Name
  EVR-no3,             !- Node 1 Name
  no7;                 !- Node 2 Name
NodeList,
  Zone1Exhausts,      !- Name
  EVR-no4,            !- Node 1 Name
  no2;                !- Node 2 Name
NodeList,
  Heat Exchanger Supply Air Nodes, !- Name
  EVR-no2,            !- Node 1 Name
  EVR-no2 2;         !- Node 2 Name
NodeList,
  Zone2Inlets,        !- Name
  EVR-no3 2,         !- Node 1 Name
  no7-2;             !- Node 2 Name
NodeList,
  Zone2Exhausts,     !- Name
  EVR-no4 2,        !- Node 1 Name
  no2-2;            !- Node 2 Name

```

---

Fonte: autor.

### 3.4.5 Análise de resultados da terceira etapa

A análise de resultados dos sistemas enfoca conforto térmico (para a ventilação natural automática) e o consumo energético (climatização artificial). A Tabela 41 apresenta os parâmetros e critérios de análise para os resultados da terceira etapa.

Tabela 41: Parâmetros e critérios para análise de resultados da terceira etapa.

| Sistema para conforto térmico | Parâmetros de análise                          | Critério de melhor desempenho                                  |
|-------------------------------|--|--|
| Ventilação natural automática | Soma mensal e anual graus horas de desconforto | Menor soma anual de graus horas de desconforto de calor e frio |
| Climatização artificial       | Consumo elétrico                               | Menor consumo elétrico anual                                   |

Fonte: autor.

Para a ventilação natural automática, as somas anuais e mensais da terceira etapa são comparados com as somas mensais e anuais da menor soma anual de graus hora determinada na segunda etapa.

Para climatização artificial, a análise é feita em duas partes. Primeiro, as seis resimulações com recuperação de calor sensível e latente, com diferentes taxas de renovação e infiltração, são analisadas. A análise compara os consumos energéticos anuais das seis resimulações para depois analisar, em detalhe, os subitens de consumo energético. Especificamente, são analisados os consumos energéticos da unidade climatizadora, dos ventiladores e do recuperador de calor. Segue-se uma análise dos consumos energéticos de cada ventilador. Estes consumos são sempre comparados com o menor consumo energético da segunda etapa. Estas análises visam analisar em detalhe o desempenho de um sistema de climatização artificial que segue o paradigma superisolado por completo.

Após esta análise, o menor consumo energético anual, entre as seis resimulações é comparado a uma nova resimulação dele com potência do recuperador de calor 10 vezes menor, testando um recuperador de altíssimo desempenho.

Este resultado é depois comparado com o melhor despenho esperado de um sistema de recuperação de calor sensível e latente em clima quente. O melhor desempenho esperado é calculado através do valor definido na literatura, sobre a redução de consumo energético (15%) entre um sistema com recuperação de calor sensível e latente

com o mesmo sistema sem essa recuperação. Estes passos visam estimar o melhor desempenho possível de um sistema de recuperação de calor sensível e latente. O menor consumo energético anual desta primeira parte pode ser então comparado com o consumo energético anual do modelo com operação adaptativa.

### 3.5 QUARTA ETAPA: BALANÇO ENERGÉTICO

#### 3.5.1 Consumos adicionais de energia

As três etapas anteriores do método lidam com o consumo energético em climatização e a otimização da eficiência do seu consumo energético. A quarta determina o balanço energético.

O balanço energético é uma soma entre um termo positivo (geração de energia) e um termo negativo (consumo energético). A quarta etapa calcula a geração fotovoltaica para Belém e Curitiba (termo positivo) e complementa o consumo energético com a inclusão dos consumos energéticos de operação de áreas transparentes e da operação de brises (termo negativo).

O consumo energético de operação de áreas transparentes é calculado somente para os melhores e piores casos para Belém e para Curitiba, para somente para o sistema de climatização ventilação natural automática, uma vez que a abertura de áreas transparentes só ocorre para este sistema

Em contrapartida, consumo energético de brises é calculado para os melhores casos e piores casos dos sistemas ventilação natural automática e climatização artificial para Belém e Curitiba, pois ambos os sistemas utilizam brises.

O cálculo de consumo de visa apresentar uma estimativa de consumo energético de pior cenário para operação para áreas transparentes e operação de brises. Assim, a potência dos motores elétricos de cada um dos sistemas é definida em 250 W, valor dos sistemas de maior potência disponíveis comercialmente para fins comerciais.

A determinação dos momentos de acionamento da operação das áreas transparentes e dos brises são requisitadas as seguintes variáveis de relatório do EnergyPlus:

- AFN Surface Venting Window or Door Opening Factor (para a operação de áreas transparentes);
- Surface Window Blind Slat Angle (para a operação de brises).

Estas variáveis apresentam relatório para cada área transparente e brise alocado garantindo assim que todos os consumos energéticos são contabilizados.

O consumo energético de operação das áreas transparentes é determinado através da comparação de *timesteps* sucessivos do relatório da variável *AFN Surface Venting Window* (nas simulações realizadas na versão 8 do EnergyPlus) or *Door Opening Factor* (nas simulações realizadas na versão 7). Sempre que se verifica a alteração de valor no relatório das variáveis entre dois *timesteps* sucessivos em qualquer uma das áreas transparentes, é assumido que o motor da respectiva área transparente foi acionado durante 5 segundo. A soma mensal dos períodos de acionamento é multiplicada por o valor da potência do motor, definindo assim os valores mensais por área transparentes que são agregados para fornecer o total mensal. A soma dos valores totais mensais permite definir o valor de consumo energético anual de operação de áreas transparentes.

Um procedimento análogo é utilizado para determinação do consumo energético dos brises. A variável utilizada neste caso é a *Surface Window Blind Slat Angle* e sempre que *timesteps* sucessivos apresentam valores distintos, assume-se a operação do motor por cinco segundo. A soma mensal dos períodos de cinco segundo por cada um dos brises determina o consumo anual mensal para esse caso. A soma dos consumos energéticos mensais determina o consumo energético anual.

### 3.5.2 Descrição do sistema fotovoltaico simulado

O sistema fotovoltaico simula o sistema fotovoltaico instalado na Eko House. Dessa forma, o sistema fotovoltaico simulado tem potência instalada de 11040 kWp simulando um painel composto por 48 módulos fotovoltaicos com 18% de eficiência pico ligados em seis strings, três orientados a norte e três a sul. Cada string é composto de oito módulos (ligados em série) para que a voltagem de saída permita

a maior eficiência de conversão do modelo de inversor utilizado na Eko House

Para efeitos de simulação, os três strings orientados a norte, são simulados como um único painel. O painel único orientado a norte tem a área igual à soma das áreas dos 24 módulos individuais que compõem os três strings orientados a norte. O mesmo procedimento é seguido para os três strings orientados a sul, resultando em dois painéis. Cada um dos painéis está ligado a um inversor com potência máxima de 5000 W, de acordo com a configuração da Eko House.

A geração fotovoltaica é calculada com o software PVsyst. Este software é específico para este fim e mais completo e confiável que o EnergyPlus na determinação do valor de geração fotovoltaica.

O modelo para a simulação da geração fotovoltaica será o modelo Sandia. Este modelo toma em consideração a influência da temperatura de célula na geração fotovoltaica sendo por isso preferível ao modelo de eficiência fixa. O modelo Sandia utiliza coeficientes adimensionais definidos empiricamente para cada modelo de módulo. Adicionalmente, Dávi (2013) verificou que este modelo de simulação apresentou maior concordância com os resultados medidos em campo.

Os valores mensais de geração fotovoltaica e são calculados os balanços energéticos mensais e anuais. Este balanço é um balanço exclusivamente operacional, como resultado da adoção da definição local de edifício de energia zero.

### **3.5.3 Análise de resultados da quarta etapa**

A análise enfoca o balanço anual e mensal de energia. É analisado o balanço e como a relação anual e mensal entre consumo total energético e geração fotovoltaica permitiriam alterações à capacidade do sistema. A análise é feita para Belém e Curitiba. A análise é feita primeiro por sistema e em segundo comparando os melhores desempenhos, de cada um dos dois sistemas para obtenção de conforto térmico, para a mesma cidade.

O balanço energético é medido de acordo com a definição local. Esta definição é escolhida pois as fontes renováveis serem responsáveis por mais de 84% da geração de eletricidade na matriz brasileira. Este fato torna praticamente indistinguíveis as definições local e primária no contexto brasileiro, sendo a definição local mais fácil de medir e implementar.

## **4 RESULTADOS**

## 4.1 PRIMEIRA ETAPA DA VENTILAÇÃO NATURAL AUTOMÁTICA

### 4.1.1 Primeira etapa da ventilação natural automática em Belém

O desempenho da ventilação natural automática é medido através da soma de graus hora de desconforto térmico, onde as maiores somas correspondem aos piores desempenhos. Para Belém, somente os graus hora desconforto térmico de calor (graus hora de calor) são contabilizados. Os graus por frio são virtualmente inexistentes e excluídos da análise.

A menor soma anual tem valor de 8 graus hora, apresentando condições de conforto térmico em todo o ano (sombreamento completo, sombreando áreas transparentes e paredes, e nível 2 de transmitância térmica, com valores de 0,14, 0,19 e 0,16 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente). Saliente-se que este valor é igual à do nível 1 de transmitância térmica, quando arredondada a unidades. Com mais casas decimais, a soma anual para o nível 2 de transmitância térmica. Feita a análise, por 90% de aceitabilidade o nível 2 tem uma soma anual de 51 graus hora comparado com 54 para o nível 2. Dessa forma, assume-se que a menor soma ocorre no nível 2.

A maior soma anual tem valor de 8296 graus hora não apresentando condições de conforto térmico (sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica, com valores de 1,86W/m<sup>2</sup>K, 3,47 W/m<sup>2</sup>K e 1,31 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente). A Tabela 42 apresenta os resultados dos casos da primeira etapa para a ventilação natural automática em Belém.

Tabela 42: Soma anual de graus hora de desconforto térmico para a ventilação natural automática em Belém.

| Transmitância térmica | Nível 1      | Nível 2      | Nível 3      | Nível 4      | Nível 5      | Nível 6      |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Sombreamento          | [Graus hora] |
| Completo              | 8            | 8            | 12           | 73           | 156          | 840          |
| Parcial               | 11           | 9            | 26           | 507          | 2049         | 5271         |
| Nulo                  | 5243         | 4732         | 4736         | 5810         | 6701         | 8206         |

Máximos anuais sublinhados e mínimos negritados.

A ventilação natural não pode baixar a temperatura do ar interno abaixo da temperatura do ar externo. No entanto, o modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 2010 determina o conforto

térmico, através da temperatura operativa que inclui temperatura do ar e temperatura radiante.

O sombreamento pode reduzir a temperatura radiante, ao reduzir a temperatura das superfícies externas, resultando em menor temperatura das superfícies internas. Da mesma forma, menores transmitâncias térmicas podem reduzir a temperatura das superfícies internas, ao reduzir a transmissão de calor das superfícies externas expostas e aquecidas pelo sol. Na região equatorial, onde Belém se situa, o aquecimento das superfícies externas é significativo.

Em ambos os casos, sombreamento e menor transmitância térmica podem reduzir a temperatura radiante, que implica na redução da temperatura operativa, resultando em maior conforto térmico.

No entanto, existe uma diferença nos efeitos do sombreamento comparado com menor transmitância térmica. Menor transmitância térmica pode provocar sobreaquecimento, ao contrário do sombreamento. Este fato explica o desempenho do envelope do nível 1 de transmitância térmica comparado com o nível 2 (com a mesma opção de sombreamento completo). Menores transmitâncias térmicas reduzem o aumento da temperatura das faces internas, mas também reduzem a perda interna de calor para o exterior, quando a temperatura interna for maior que a externa. Durante a noite, baixam as temperaturas das superfícies externas, assim como a temperatura do ar, enquanto as superfícies internas estiveram aquecendo durante o dia com o calor transmitido das superfícies externas. Quanto menor a transmitância térmica, menor a capacidade de perder o calor acumulado durante a noite. Este calor acumulado depende também das cargas internas. Quanto maiores as cargas internas e menor a transmitância térmica maior, o acúmulo de calor no interior. Note-se que a carga interna utilizada nas simulações é bastante reduzida, com presença de usuários durante o início da noite até o início da manhã que reduz este efeito.

Dessa forma, os resultados aqui apresentados resultam da baixa taxa de infiltração (que reduz o aquecimento nos períodos mais quentes) e da carga térmica e padrão de uso. Os resultados mostram a sensibilidade ao sobreaquecimento. Mesmo com um padrão de uso favorável, o mesmo valor de soma anual de graus hora no nível 1 comparado com o nível 2, mostra que o perigo de sobreaquecimento limita o uso da redução de transmitância térmica como forma de reduzir temperatura operativa para aumento do conforto térmico.

Para a opção sombreamento nulo, que aumenta o aquecimento interno, a segunda menor soma anual de graus hora ocorre para o nível 3 de transmitância térmica e não para o nível 1, como ocorre nas outras duas opções de sombreamento. O não sombreamento das áreas transparentes e paredes, e aquecimento interno correspondente, resultam que a menor soma anual de graus hora ocorre com maior transmitância térmica. Esta maior transmitância térmica, embora resulte em maiores ganhos de calor das superfícies externas para as internas, é necessária para aumentar a perda de calor interno para o exterior.

Evitar o sobreaquecimento com baixa transmitância térmica, sem uso de sistemas artificiais de climatização, no clima de Belém, depende de redução de carga interna o que nem sempre é possível. O cânon da arquitetura tropical de climas quentes e úmidos defende edifícios leves bem sombreados, exatamente dados os perigos do sobreaquecimento. No entanto, para baixas cargas internas durante o dia, os resultados mostram ser possível manter a temperatura mais baixa da noite até à noite seguinte com transmitância térmica baixa e baixa infiltração.

O sombreamento não provoca sobreaquecimento, mas por si só não foi capaz de garantir condições de conforto térmico em qualquer dos níveis de transmitância térmica, embora sempre melhore as condições de conforto térmico. Para todos os níveis de transmitância térmica, as menores somas anuais de graus hora ocorrem para a opção sombreamento total, seguindo-se a opção sombreamento parcial, tendo a opção sombreamento nulo as maiores somas anuais de graus hora.

Os resultados mostram que o sombreamento de parede é mais relevante com o aumento da transmitância térmica. Quanto maior a transmitância térmica, maior e mais rápida a influência do aumento da temperatura das superfícies externas nas superfícies internas. Como exemplo, para o nível 2 de transmitância térmica as somas anuais da opção sombreamento completo para o sombreamento parcial é de 8 para 9 graus hora (respectivamente) sendo negligenciável. Assim, o sombreamento de parede não é relevante. A baixa transmitância térmica do nível 2, torna negligenciável a influência do aumento da temperatura das superfícies externas nas internas.

No entanto, comparando os resultados da opção de sombreamento parcial e sombreamento nulo, no nível 2 de

transmitância térmica, a soma anual de graus hora aumenta de 9 para 4732, respectivamente. Neste caso, não é a condução de calor das superfícies externas para internas o responsável pelo aumento da soma anual de graus hora. Este resultado reforça o perigo do sobreaquecimento em edifícios com baixa transmitância térmica. A falta de sombreamento das áreas transparentes, aquece o ar interno e a baixa transmitância térmica reduz a perda de calor do ar interno aquecido através das superfícies opacas, resultando em acúmulo de calor e sobreaquecimento.

Com maior transmitância térmica os resultados alteram-se. Para o nível 6 de transmitância térmica (o maior nível) comparando os resultados das opções sombreamento completo e parcial, as somas anuais aumentam de 840 para 5271, respectivamente, enquanto a soma anual para a opção sombreamento nulo tem um valor de 8206. Com maior transmitância a maior diferença de graus hora ocorre entre as opções sombreamento completo e parcial, mostrando a importância do sombreamento de parede. Neste caso, a alta transmitância térmica implica que o aquecimento das superfícies externas tem uma influência elevada no aumento das temperaturas das superfícies internas, aumentando a temperatura radiante, resultando em um aumento dos graus hora de calor. Este efeito é superior, para maiores transmitâncias térmicas, ao aumento de graus hora de desconforto provocado por o não sombreamento de áreas transparentes. Desta forma, para transmitâncias térmicas mais elevadas, o sombreamento de parede, além das áreas transparentes mostra-se importante em Belém. A transmitância térmica do nível 6 é equivalente à de uma tábua de madeira, sendo que muita da construção de baixa renda na região amazônica, consiste em casas de madeira. Para este nível de transmitância térmica, os resultados quantificam que o sombreamento de áreas transparentes e parede, comparado com o não sombreamento, reduz os graus hora de desconforto térmico de 8206 para 840 graus hora.

#### 4.1.2 Amplitudes e frequências de graus hora

Segue-se a análise das amplitudes e frequências de graus hora. Esta análise é feita para os níveis 2 e 6 de transmitância térmica com as opções de sombreamento completo e nulo. Estes dois níveis de transmitância térmica apresentam as menores e maiores somas anuais de graus hora representando os extremos de desempenho em Belém da ventilação natural automática. A Tabela 43 apresenta os resultados para o nível 2 de transmitância térmica e opção sombreamento completo

Tabela 43: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 2 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Belém

| Amplitude | Jan.      | Fev.     | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|-----------|-----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1         | <u>12</u> | <u>1</u> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 2         | <b>2</b>  | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 3         | 0         | 0        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

Mínimos mensais negritados, máximos sublinhados.

A Tabela 44 apresenta as amplitudes de graus hora para o nível 2 de transmissão térmica, mas com a opção sombreamento nulo.

Tabela 44: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 2 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Belém

| Amplitude | Jan.      | Fev.      | Mar.      | Abr.      | Mai.      | Jun.      | Jul.      | Ago.      | Set.      | Out.      | Nov.      | Dez.      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1         | <u>74</u> | <u>56</u> | <u>66</u> | <u>60</u> | 49        | 57        | 53        | 57        | 67        | 63        | 67        | <u>63</u> |
| 2         | 61        | 47        | 66        | 51        | <u>58</u> | <u>74</u> | 65        | <u>75</u> | <u>72</u> | <u>78</u> | <u>68</u> | 49        |
| 3         | 60        | 49        | 50        | 28        | 54        | 59        | <u>76</u> | 63        | 70        | 59        | 56        | 42        |
| 4         | 53        | 36        | 31        | <b>5</b>  | <b>31</b> | <b>22</b> | <b>26</b> | 36        | <b>37</b> | 31        | 36        | <b>13</b> |
| 5         | 27        | 17        | <b>5</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 7         | 0         | <b>1</b>  | <b>2</b>  | 0         |
| 6         | 15        | <b>2</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 7         | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 8         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

Mínimos mensais negritados, máximos sublinhados.

A análise da Tabela 43 e 42 mostra que sombreamento completo não só reduz a soma anual de graus horas como muda qualitativamente a amplitude dos graus hora. Com a opção sombreamento completo, a maior amplitude de graus hora tem o valor dois. Em contrapartida, com opção sombreamento nulo a amplitude máxima de graus hora aumenta para cinco, com maiores frequências. Estes resultados mostram que alteração de opção de sombreamento não só aumenta quantitativamente a soma de graus hora, como sugere um aumento qualitativo na intensidade do desconforto térmico.

As Tabela 45 e 44, apresentam as amplitudes e frequências de graus hora para o nível 6 de transmitância térmica com as opções de sombreamento completo e nulo, respectivamente. Os resultados também mostram também uma ampliação de amplitude dos graus hora com a opção de sombreamento nulo.

Tabela 45: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Belém

| Amplitude | Jan.      | Fev.      | Mar.      | Abr.      | Mai.      | Jun.      | Jul.      | Ago.      | Set.      | Out.      | Nov.      | Dez.      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1         | <u>57</u> | <u>36</u> | <u>51</u> | <u>23</u> | <u>42</u> | <u>58</u> | <u>67</u> | <u>65</u> | <u>75</u> | <u>56</u> | <u>54</u> | <u>40</u> |
| 2         | 36        | 35        | 23        | <b>2</b>  | <b>23</b> | <b>14</b> | <b>23</b> | 29        | 33        | 28        | <b>23</b> | <b>2</b>  |
| 3         | 23        | <b>17</b> | <b>4</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | <b>1</b>  | <b>2</b>  | <b>1</b>  | 0         | 0         |
| 4         | 13        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 5         | <b>2</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 6         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

Mínimos mensais negritados, máximos sublinhados.

Tabela 46: Amplitude e frequência mensais de graus hora para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Belém

| Amplitude | Jan.      | Fev.      | Mar.      | Abr.      | Mai.      | Jun.      | Jul.      | Ago.      | Set.      | Out.      | Nov.      | Dez.      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1         | 43        | 32        | 24        | 30        | 27        | 23        | 21        | 33        | 35        | 28        | 30        | 39        |
| 2         | 33        | 35        | 43        | <u>40</u> | 42        | 33        | 32        | 39        | 36        | 38        | 42        | 29        |
| 3         | 36        | 28        | 33        | <u>40</u> | 37        | 53        | 53        | 47        | 49        | 44        | 39        | 43        |
| 4         | <u>44</u> | 36        | 45        | 34        | <u>53</u> | <u>65</u> | <u>68</u> | <u>63</u> | 60        | <u>64</u> | 50        | <u>45</u> |
| 5         | 42        | <u>37</u> | <u>53</u> | 32        | 44        | 49        | 62        | 56        | <u>62</u> | 51        | <u>55</u> | 38        |
| 6         | 41        | 36        | 20        | <b>2</b>  | <b>13</b> | <b>2</b>  | <b>1</b>  | <b>21</b> | 17        | <b>19</b> | 19        | <b>4</b>  |
| 7         | 18        | <b>6</b>  | <b>2</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | <b>1</b>  | 0         | <b>2</b>  | 0         |
| 8         | <b>11</b> | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 9         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

Mínimos mensais negritados, máximos sublinhados.

Verifica-se também que as maiores frequências mensais de graus hora na opção sombreamento nulo ocorrem entre as amplitudes 3 e 5, que são mais esporádicos na opção sombreamento completo, demonstrando um desconforto mais intenso que decorre do não sombreamento das áreas transparentes e paredes.

#### 4.1.3 Primeira etapa da ventilação natural automática em Curitiba

O desempenho da ventilação natural automática é medido através da soma de graus hora de desconforto térmico de calor e frio. Esta soma anual é composta pelas somas de graus hora de calor e a soma anual de graus hora de frio.

A menor soma anual de graus hora tem o valor de 2016 graus hora de desconforto térmico de calor e frio (sombreamento nulo e nível 1 de transmitância térmica, com valores de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente). A maior soma anual de graus hora tem o valor de 26472 graus hora (sombreamento completo e o nível 6 de transmitância térmica, com valores de 1,86W/m<sup>2</sup>K, 3,47 W/m<sup>2</sup>K e 1,31 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente). Nenhum dos casos garante condições

mínimas de conforto térmico. A Tabela 47 apresenta os resultados da soma anual de graus hora de desconforto térmico de calor e frio.

Tabela 47: Comparação dos consumos anuais para a ventilação natural automática em Curitiba.

| Transmitância térmica | Nível 1      | Nível 2      | Nível 3      | Nível 4      | Nível 5      | Nível 6      |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Sombreamento          | [Graus hora] |
| Completo              | 12709        | 13727        | 15803        | 20920        | 23305        | 26472        |
| Parcial               | 12222        | 12387        | 13844        | 17729        | 18823        | 21771        |
| Nulo                  | 2016         | 2103         | 3322         | 9971         | 14057        | 19518        |

Máximos anuais sublinhados e mínimos negritados.

Curitiba apresenta graus hora de calor e frio. Dessa forma, é útil separar os graus hora de desconforto térmico de calor dos graus horas de frio. A Tabela 48 apresenta as somas anuais de graus hora de calor e os de frio.

Tabela 48: Somas anuais de graus hora desconforto térmico de calor e frio para a ventilação natural automática em Curitiba

| Transmitância térmica |       | Nível 1      | Nível 2      | Nível 3      | Nível 4      | Nível 5      | Nível 6      |
|-----------------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Sombreamento          |       | [Graus hora] |
| Completo              | Calor | <b>0</b>     | <b>0</b>     | <b>0</b>     | 4            | 12           | 71           |
|                       | Frio  | 12709        | 13727        | 15803        | 20915        | 23293        | <u>26401</u> |
| Parcial               | Calor | <b>0</b>     | <b>0</b>     | <b>0</b>     | 22           | 99           | 433          |
|                       | Frio  | 12222        | 12387        | 13844        | 17707        | 18724        | <u>21338</u> |
| Nulo                  | Calor | 641          | 589          | <b>581</b>   | 624          | 695          | 963          |
|                       | Frio  | 1374         | 1514         | 2741         | 9347         | 13362        | <u>18555</u> |

Máximos anuais sublinhados e mínimos negritados.

A Tabela 48 mostra que a menor soma anual de graus hora de desconforto térmico de calor e frio corresponde ao caso com a menor soma anual de graus hora de frio, 1374, para o nível 1 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo. Uma vez que os graus hora frio predominam sobre os de calor, a redução da soma anual graus hora de frio resulta numa menor soma anual de graus hora de calor e frio. É de salientar que a menor soma anual de graus hora ocorre para o nível 3 de transmitância térmica.

A ventilação natural automática em Curitiba tem de lidar com as demandas opostas de períodos de calor ou frio.

Nos períodos de frio, com a ventilação natural automática em Curitiba, dispõe de dois mecanismos: baixa transmitância térmica (que reduz o fluxo de calor do interior para o exterior, quando a temperatura interior é superior à temperatura exterior) e a irradiação solar (que permite o aquecimento do ar interno).

Para os períodos de calor, a ventilação natural automática em Curitiba, dispõe da operação das áreas transparentes complementado pelo sombreamento de áreas transparentes e parede, dependendo do caso simulado.

No entanto, estes mecanismos podem ter efeitos opostos dependendo da necessidade de lidar com períodos de calor ou frio. Por exemplo, a opção sombreamento nulo reduz os graus hora de frio mas aumenta os de calor. Estes efeitos opostos são importantes considerar para a análise dos resultados.

Considerados isoladamente, os menores níveis de transmitância térmica resultam nas menores somas de graus hora de calor e frio. Menores transmitâncias térmicas reduzem a transmissão de calor do interior para o exterior nos períodos de frio, resultando em menores somas de graus horas de frio. Como as condições de frio são preponderantes sobre as de calor em Curitiba resulta em menores somas anuais de graus hora de calor e frio. Esta análise pode ser comprovada comparando os resultados da opção sombreamento completo com a opção sombreamento nulo.

Para opção sombreamento completo, menores os níveis de transmitância térmica resultam em menores as somas anuais de graus hora de frio. Ademais, para as transmitâncias térmicas menores dos níveis 1, 2, e 3 não se verificam graus hora de calor. Nos níveis 4, 5, e 6 de transmitância térmica, com maior transmitância térmica, apresentam também graus hora de calor, além de graus hora de frio. A maior transmitância térmica permite uma maior transferência de calor, que é suficiente para provocar graus hora de calor. O valor da soma anual de graus hora de calor aumenta com a transmitância térmica, tendo o valor negligenciável de 4 graus hora de calor para o nível 4 de transmitância térmica e aumentando para 71 graus horas de calor para o nível 6 de transmitância térmica. Dado que a opção sombreamento completo representa uma situação artificial, com um sombreamento ideal das paredes, durante todas as horas do dia com incidência zero de irradiação solar em qualquer das paredes, decorre

que estes ganhos são ganhos de calor decorrentes de condução e convecção de calor do exterior para o interior.

Em contrapartida, a análise da opção de sombreamento nulo, inclui a influência da irradiação solar, que torna mais complexa a análise dos resultados. Em primeiro lugar, a irradiação solar, funciona como um sistema de aquecimento. A irradiação solar eleva a temperatura média interna, aumentando as horas que a temperatura interna está dentro dos limites de conforto térmico, resultando na redução da soma anual de graus hora de frio. Comparando por níveis de transmitância térmica iguais, as menores somas anuais de graus hora de frio sempre ocorrem para a opção sombreamento nulo.

Mas a irradiação solar não aquece somente até ao limite superior da temperatura de conforto térmico. Por vezes, a irradiação solar provoca sobreaquecimento. O sobreaquecimento não depende só da irradiação solar, que é a mesma, para todos os casos simulados.

O sobreaquecimento, na opção sombreamento nulo, também é influenciado pelo nível de transmitância térmica. Níveis menores de transmitância térmica propiciam a acumulação de calor. Dessa forma, ao contrário do que ocorre para as opções sombreamento completo e parcial, as menores transmitâncias térmicas também apresentam somas anuais de graus hora de calor.

Verifica-se também que a menor soma anual de graus hora de calor para a opção sombreamento nulo (581 graus hora) é maior que qualquer das somas anuais de graus hora, das outras opções de sombreamento, independentemente do nível de transmitância térmica.

Níveis menores de transmitância térmica facilitam acumulação de calor provocado pela irradiação solar, resultando em maiores somas anuais de graus hora. Por outro lado, as maiores transmitâncias térmicas permitem maior transmissão de calor, decorrente do aquecimento das superfícies externas e sua condução para as superfícies internas. A conjugação destes dois fenômenos provoca que a menor soma anual de graus hora de calor ocorra no nível 3 de transmitância térmica com o valor de 581 graus hora, o ponto de inflexão, entre a soma anual de 641 graus hora de calor para o nível 1 de transmitância térmica e 963 graus hora de calor para o nível 6 de transmitância térmica.

A interação entre irradiação solar e transmitância térmica, explica por que a menor soma anual de graus hora de calor e frio ocorre no nível 1 de transmitância térmica. A menor soma anual de

graus hora de frio compensa o valor maior na soma de graus hora de calor, comparado com o nível 3 de transmitância térmica.

#### 4.1.4 Amplitude de graus hora de desconforto térmico e transmitância térmica em Curitiba

Segue-se a análise das amplitudes e frequências de graus hora. Esta análise é feita para os níveis 1 e 6 de transmitância térmica com as opções de sombreamento completo e nulo. Estes dois níveis de transmitância térmica apresentam as menores e maiores somas anuais de graus hora. A análise aborda graus hora de calor e de frio.

A Tabela 49 apresenta as amplitudes e frequências mensais de graus hora de calor para o nível 1 de transmitância térmica com a opção sombreamento nulo. Este caso é aquele que apresenta menor soma anual de graus hora de calor e frio, embora não apresente a menor soma de graus anual hora de calor na opção sombreamento nulo.

Tabela 49: Amplitude e frequência mensais de graus hora de calor para o nível 1 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba

| Amplitude | Jan.      | Fev.      | Mar.      | Abr.      | Mai.      | Jun. | Jul.     | Ago.      | Set.      | Out.      | Nov.     | Dez.      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 1         | <u>38</u> | <u>54</u> | <u>29</u> | <u>11</u> | <u>10</u> | 0    | <u>5</u> | <u>31</u> | 7         | <u>27</u> | <u>6</u> | <u>29</u> |
| 2         | 26        | 19        | 9         | 4         | 0         | 0    | 2        | 17        | <u>10</u> | 13        | 3        | 18        |
| 3         | 16        | <b>1</b>  | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0    | 0        | 11        | 3         | 18        | <b>1</b> | 8         |
| 4         | 5         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0        | <b>1</b>  | 6         | 6         | 0        | 13        |
| 5         | <b>2</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0        | 0         | <b>3</b>  | 6         | 0        | 5         |
| 6         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0        | 0         | 0         | <b>3</b>  | 0        | <b>1</b>  |
| 7         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0        | 0         | 0         | 0         | 0        | 0         |

Máximos mensais sublinhados e mínimos negritados.

A Tabela 49 mostra uma amplitude elevada de graus hora de calor. A combinação de ausência de sombreamento de áreas transparentes de paredes, conjugada com reduzida transmitância térmica, provocou sobreaquecimento em onze meses do ano e amplitudes de graus hora de até 6 graus. A exceção é o mês de julho, com as temperaturas médias mais baixas do ano, não apresenta graus

hora de calor. As maiores amplitudes de graus hora ocorrem nos meses com temperaturas mais altas.

No entanto, agosto, setembro e outubro apresentam maiores amplitudes e frequências de graus hora de calor que novembro. Este fato aponta que não é a temperatura média mensal o principal fator na determinação de graus hora de calor. A reduzida transmitância térmica do nível 1 reduz significativamente a transmissão de calor por condução e convecção. Dessa forma, o principal fator provocando os graus hora de calor e aumentando a sua amplitude, são maiores períodos de incidência solar nas áreas transparentes. A incidência de irradiação solar nas áreas transparentes provoca o aquecimento interno que a reduzida transmitância térmica do nível 1 de transmitância térmica amplifica.

A Tabela 50 apresenta as amplitudes e frequências mensais de graus hora de frio para o nível 1 de transmitância térmica e opção sombreamento nulo.

Tabela 50: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 1 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba

| Amplitude | Jan. | Fev. | Mar.     | Abr.     | Mai.      | Jun.     | Jul.     | Ago.     | Set.     | Out.     | Nov. | Dez. |
|-----------|------|------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|
| 1         | 0    | 0    | <u>2</u> | 25       | 88        | 76       | 49       | 67       | 68       | 25       | 0    | 0    |
| 2         | 0    | 0    | 0        | 3        | 65        | 61       | 30       | 50       | 56       | 10       | 0    | 0    |
| 3         | 0    | 0    | 0        | <b>1</b> | 51        | 60       | <b>8</b> | 20       | 22       | <b>3</b> | 0    | 0    |
| 4         | 0    | 0    | 0        | 0        | <b>16</b> | 34       | 0        | <b>9</b> | <b>1</b> | 0        | 0    | 0    |
| 5         | 0    | 0    | 0        | 0        | 0         | 24       | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    |
| 6         | 0    | 0    | 0        | 0        | 0         | 6        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    |
| 7         | 0    | 0    | 0        | 0        | 0         | 4        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    |
| 8         | 0    | 0    | 0        | 0        | 0         | <b>4</b> | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    |
| 9         | 0    | 0    | 0        | 0        | 0         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    |

Máximos mensais sublinhados e mínimos negritos.

Apesar deste caso apresentar a menor soma anual de graus hora de calor e frio, e a menor soma anual de graus hora de frio especificamente, verifica-se amplitude máxima de 8 graus hora. Este valor representa um desconforto térmico acentuado.

Ao contrário dos graus hora de calor, que ocorrem em todos os meses exceto julho, verificam-se quatro meses sem graus hora de frio. Os graus hora de calor estão ligados a sobreaquecimento resultado de incidência prolongada de irradiação solar. Dessa forma, ocorrem quase todo o ano em Curitiba.

Os graus horas de frio, por sua vez, estão ligados a temperaturas externas com valores inferiores ao limite mínimo de conforto térmico, por períodos extensos. Tais temperaturas vão reduzindo a temperatura interna até provocarem condições de desconforto térmico. Principalmente durante o período noturno, durante os meses de inverno, o calor acumulado durante o dia não é suficiente para garantir condições de conforto térmico durante a noite.

Dessa forma, os graus hora de calor, provocados por sobreaquecimento são o fenômeno diurno, que a baixa transmitância térmica do nível 1 propicia que ocorram virtualmente todo o ano. Ao contrário, os graus hora de frio são essencialmente noturnos e sazonais. Para ambos os casos, estes resultados estão ligados à carga interna específica. Um aumento da carga interna poderia reduzir os graus hora de frio, mas arriscaria a aumentar os graus hora de calor.

Como comparação, a Tabela 51 apresenta as amplitudes e frequência de graus hora de frio para Curitiba para o nível 1 de transmitância térmica e com a opção sombreamento completo. A eliminação da irradiação solar, provoca um aumento dos graus hora de frio, que passam a ocorrer todo o ano e o fim dos graus hora de calor, que não ocorrem mais.

A Tabela 51 mostra uma maior amplitude de graus hora de frio atingindo o valor 12, também um resultado da eliminação da irradiação solar.

Tabela 51: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 1 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Curitiba

| Amplitude | Jan.       | Fev. | Mar.       | Abr.       | Mai.       | Jun.       | Jul.       | Ago.       | Set.       | Out.       | Nov.       | Dez.       |
|-----------|------------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1         | <u>116</u> | 14   | <u>126</u> | 190        | <u>363</u> | 73         | 107        | 98         | 40         | 93         | <u>153</u> | <u>137</u> |
| 2         | 83         | 0    | 86         | <u>237</u> | 308        | 90         | <u>186</u> | 104        | 48         | <u>117</u> | 128        | 130        |
| 3         | <b>6</b>   | 0    | <b>25</b>  | 103        | 137        | 87         | 165        | <u>121</u> | 67         | 99         | 99         | <b>35</b>  |
| 4         | 0          | 0    | 0          | 15         | 107        | 73         | 118        | 94         | <u>169</u> | 44         | <b>1</b>   | 0          |
| 5         | 0          | 0    | 0          | <b>4</b>   | 152        | 78         | 83         | 95         | 152        | 37         | 0          | 0          |
| 6         | 0          | 0    | 0          | 0          | 156        | <u>100</u> | 26         | 35         | 111        | 12         | 0          | 0          |
| 7         | 0          | 0    | 0          | 0          | 44         | 81         | <b>2</b>   | <b>14</b>  | <b>29</b>  | <b>2</b>   | 0          | 0          |
| 8         | 0          | 0    | 0          | 0          | <b>4</b>   | 49         | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 9         | 0          | 0    | 0          | 0          | 0          | 23         | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 10        | 0          | 0    | 0          | 0          | 0          | 13         | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 11        | 0          | 0    | 0          | 0          | 0          | 13         | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 12        | 0          | 0    | 0          | 0          | 0          | <b>6</b>   | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 13        | 0          | 0    | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |

Máximos mensais sublinhados e mínimos negritados.

A Tabela 52 apresenta as amplitudes e frequências mensais de graus hora de calor, com o nível 6 de transmitância térmica com a opção sombreamento completo. Este é o caso com maior soma anual de graus hora de calor e frio.

Tabela 52: Amplitude e frequência mensais de graus hora de calor para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Curitiba

| Amplitude | Jan.      | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set.     | Out. | Nov. | Dez.      |
|-----------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|----------|------|------|-----------|
| 1         | <u>11</u> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 2    | <u>5</u> | 11   | 0    | <u>11</u> |
| 2         | <b>1</b>  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | <u>5</u> | 3    | 0    | 8         |
| 3         | 2         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0        | 2    | 0    | 4         |
| 4         | 0         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0        | 3    | 0    | 0         |
| 5         | 0         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    | 0         |

Máximos mensais sublinhados e mínimos negritados.

Os resultados confirmam que, apesar da preponderância de graus hora de frio, verificam-se ainda condições de calor significativas com amplitudes de até 4 graus acima do limite de conforto térmico. Uma vez que estes resultados correspondem à opção sombreamento completo, decorre que este aquecimento do ar interno é devido à transmissão e convecção, transmitindo o calor do exterior para o interior.

A Tabela 53 complementa a Tabela 52, apresentando as amplitudes e frequências de graus hora de frio com o nível 6 de transmitância térmica e opção sombreamento completo. A elevada transmitância térmica e conjugada com a não incidência de irradiação solar resultam em amplitudes elevadas de graus hora de frio, assim como frequências. Também se verifica que maiores amplitudes mensais de graus hora, tendem a fazer as frequências máximas mensais ocorrerem em amplitudes maiores.

Tabela 53: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento completo em Curitiba

| Amplitude | Jan.      | Fev.       | Mar.       | Abr.       | Mai.       | Jun.      | Jul.      | Ago.       | Set.      | Out.      | Nov.       | Dez.      |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| 1         | <u>94</u> | <u>102</u> | 90         | 56         | 102        | 28        | 51        | 35         | 19        | 65        | 83         | 81        |
| 2         | 71        | 93         | <u>104</u> | 67         | 120        | 39        | 62        | 32         | 26        | 65        | 112        | <u>94</u> |
| 3         | <b>88</b> | 65         | 100        | 91         | 153        | 45        | 66        | 61         | 53        | 81        | <u>127</u> | 84        |
| 4         | 79        | 24         | 76         | 94         | 188        | 65        | 72        | 68         | 91        | <u>97</u> | 106        | 85        |
| 5         | <b>24</b> | <b>13</b>  | 49         | <u>112</u> | <u>203</u> | <u>90</u> | <u>78</u> | <u>103</u> | 90        | 93        | 58         | 73        |
| 6         | 0         | 0          | 29         | 74         | 167        | 77        | 77        | 101        | <u>96</u> | 60        | 48         | 30        |
| 7         | 0         | 0          | 7          | 33         | 116        | 65        | 60        | 69         | 89        | 30        | <b>11</b>  | 11        |
| 8         | 0         | 0          | 0          | 19         | 95         | 58        | 44        | 75         | 72        | 27        | 0          | 4         |
| 9         | 0         | 0          | 0          | 9          | 68         | 52        | 44        | 24         | 52        | <b>6</b>  | 0          | <b>2</b>  |
| 10        | 0         | 0          | 0          | 5          | 45         | 39        | 25        | 14         | 21        | 7         | 0          | 0         |
| 11        | 0         | 0          | 0          | <b>1</b>   | 27         | 27        | 18        | 10         | 13        | 0         | 0          | 0         |
| 12        | 0         | 0          | 0          | 0          | <b>18</b>  | 11        | 4         | 5          | 10        | 0         | 0          | 0         |
| 13        | 0         | 0          | 0          | 0          | <b>6</b>   | 11        | <b>5</b>  | <b>2</b>   | 6         | 0         | 0          | 0         |
| 14        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | 10        | 0         | 0          | <b>2</b>  | 0         | 0          | 0         |
| 15        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | 12        | 0         | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         |
| 16        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | 5         | 0         | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         |
| 17        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | 7         | 0         | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         |
| 18        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | 5         | 0         | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         |
| 19        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | 2         | 0         | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         |
| 20        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | <b>1</b>  | 0         | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         |
| 21        | 0         | 0          | 0          | 0          | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         | 0          | 0         |

Máximos mensais sublinhados e mínimos negritados.

Finalmente, para termos de comparação, a Tabela 54 apresenta os graus hora de calor para o nível 6 de transmitância térmica com a opção sombreamento nulo.

Tabela 54: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba

| Amplitude | Jan.      | Fev.      | Mar.      | Abr.      | Mai.      | Jun. | Jul. | Ago.      | Set.     | Out.      | Nov.      | Dez.      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1         | <u>28</u> | <u>53</u> | <u>31</u> | <u>15</u> | <u>14</u> | 0    | 8    | <u>20</u> | 6        | <u>27</u> | <u>16</u> | <u>26</u> |
| 2         | 26        | 29        | 16        | 9         | 7         | 0    | 2    | 20        | 6        | 18        | 3         | 21        |
| 3         | 21        | <b>11</b> | 8         | 2         | 0         | 0    | 3    | 14        | 10       | 14        | <b>3</b>  | 17        |
| 4         | 13        | 0         | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0    | 0    | 7         | <b>2</b> | 10        | 0         | 6         |
| 5         | 3         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0    | 0         | 6        | 8         | 0         | 9         |
| 6         | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0    | 0         | <b>2</b> | 5         | 0         | 8         |
| 7         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0    | 0         | 0        | <b>3</b>  | 0         | <b>1</b>  |
| 8         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0    | 0    | 0         | 0        | 0         | 0         | 0         |

Máximos mensais sublinhados e mínimos negritos.

A elevada transmitância térmica do nível 6 perante a incidência de irradiação solar aumenta amplitude máxima dos graus hora de calor de 4 para 7. O número de meses com ocorrência de graus hora de calor, comparando o nível 6 de transmitância térmica da opção sombreamento completo para nulo, eleva-se de 5 para 11.

Este aumento de graus hora de calor não se deve somente à irradiação nas áreas transparentes, mas também ao aumento da temperatura das superfícies internas, devido ao aumento de temperatura das superfícies externas devido à irradiação solar.

Apesar deste aumento de graus hora, o mês de junho não apresenta graus hora de calor. Embora a elevada transmitância térmica do nível 6 permita um maior ganho de calor por irradiação solar nas paredes, também permite uma maior perda de calor por condução e convecção. Assim, na presença de dias menores em junho e temperaturas média do ar reduzidas, não ocorrem graus hora.

A Tabela 55 apresenta as amplitudes e frequências mensais de graus hora de frio, com o nível 6 de transmitância térmica e opção sombreamento nulo.

Tabela 55: Amplitude e frequência mensais de graus hora de frio para o nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo em Curitiba

| Amplitude | Jan.      | Fev.      | Mar.      | Abr.      | Mai.       | Jun.      | Jul.      | Ago.      | Set.      | Out.      | Nov.      | Dez.      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1         | <u>68</u> | 65        | 66        | 37        | 80         | 34        | 40        | 32        | 29        | 58        | 68        | 58        |
| 2         | 53        | <u>73</u> | 75        | 45        | 99         | 44        | 34        | 43        | 51        | 64        | <u>86</u> | <u>63</u> |
| 3         | 49        | 38        | <u>83</u> | 75        | 137        | 58        | 51        | 63        | 50        | 56        | 77        | 52        |
| 4         | 41        | 15        | 43        | <u>89</u> | <u>168</u> | 57        | 55        | 74        | <u>61</u> | <u>87</u> | 67        | 56        |
| 5         | <b>13</b> | <b>3</b>  | 35        | 83        | 149        | <u>74</u> | 57        | <u>82</u> | 60        | 72        | 28        | 42        |
| 6         | 0         | 0         | <b>19</b> | 53        | 129        | 67        | <u>60</u> | 68        | 59        | 32        | 35        | 18        |
| 7         | 0         | 0         | 0         | 25        | 78         | 47        | 50        | 54        | 62        | 19        | <b>5</b>  | 4         |
| 8         | 0         | 0         | 0         | 8         | 65         | 35        | 39        | 47        | 55        | 12        | 0         | 2         |
| 9         | 0         | 0         | 0         | 3         | 40         | 34        | 28        | 17        | 34        | 5         | 0         | <b>1</b>  |
| 10        | 0         | 0         | 0         | <b>1</b>  | 22         | 27        | 17        | 10        | 8         | <b>3</b>  | 0         | 0         |
| 11        | 0         | 0         | 0         | <b>1</b>  | 18         | 16        | 8         | <b>3</b>  | 10        | 0         | 0         | 0         |
| 12        | 0         | 0         | 0         | 0         | 12         | 8         | 2         | 6         | 7         | 0         | 0         | 0         |
| 13        | 0         | 0         | 0         | 0         | <b>3</b>   | 10        | <b>2</b>  | 0         | <b>2</b>  | 0         | 0         | 0         |
| 14        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 6         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 15        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 9         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 16        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 6         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 17        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | <b>2</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 18        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

Máximos mensais sublinhados e mínimos negritados.

Apesar da incidência de irradiação solar, em áreas transparentes e paredes, a amplitude máxima mensal apresentou uma redução de 20 (opção sombreamento completo) para 17. Estes confirmam que a redução de graus hora de frio depende mais da transmitância térmica e temperaturas externas que da irradiação solar, no presente contexto. Dada a transmitância térmica elevada do nível 6, mesmo o aumento das cargas internas não alteraria significativamente a situação.

As amplitudes de graus hora de frio com valores de 20 e 17 podem parecer demasiadas. No entanto, as mesmas são decorrentes das condições climáticas extremas de junho e da elevada transmitância térmica do nível 6.

A Figura 44 apresenta um perfil horário das temperaturas interna e externa no dia 17 de junho, onde se verifica a amplitude máxima de graus hora no nível 6 de transmitância térmica com a opção sombreamento nulo. A temperatura de referência para conforto térmico segundo a ASHRAE 55 2010 tem o valor de 22,6 °C no dia 17 de junho resultando em uma temperatura mínima de conforto térmico de 19,1 °C. Com a temperatura interna atingindo 0,6 °C perto das 8:00 resulta numa amplitude de graus hora de frio com valor de 17.

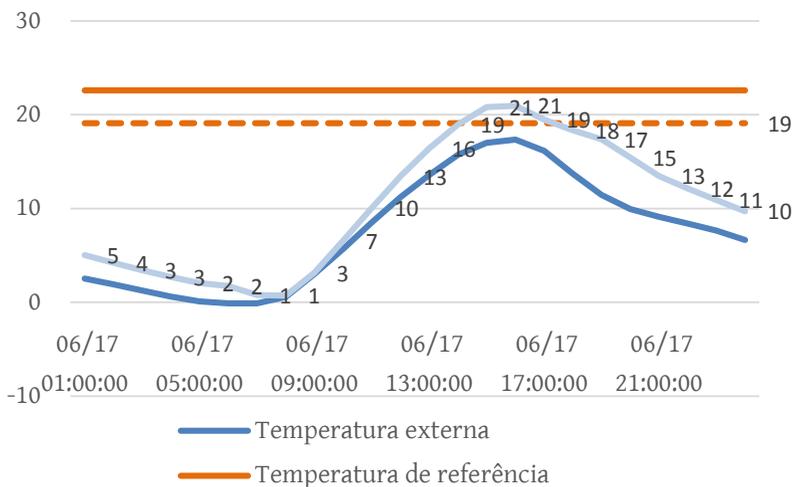


Figura 44: Exemplo de perfis de temperatura para dia com maior amplitude de graus hora de frio no nível 6 de transmitância térmica com opção sombreamento nulo.

## 4.2 PRIMEIRA ETAPA DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL

### 4.2.1 Primeira etapa da climatização artificial em Belém

O desempenho da climatização artificial é medido em kWh, referentes ao consumo energético (elétrico) total de ventilador e unidade condicionadora do sistema. Os menores consumos energéticos correspondem aos melhores resultados.

O menor consumo energético ocorre com a opção sombreamento completo e nível 1 de transmitância térmica. O maior consumo energético ocorre com a opção sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica. A Tabela 56 apresenta os resultados da primeira etapa.

Tabela 56: Consumos anuais para a climatização artificial em Belém.

| Transmitância<br>térmica | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 | Nível 4 | Nível 5 | Nível 6 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sombreamento             | [kWh]   | [kWh]   | [kWh]   | [kWh]   | [kWh]   | [kWh]   |
| Completo                 | 2744    | 2799    | 3020    | 3843    | 4245    | 4973    |
| Parcial                  | 2772    | 2917    | 3206    | 4157    | 4776    | 6551    |
| Nulo                     | 4580    | 4646    | 4892    | 6023    | 6980    | 8486    |

Máximos anuais sublinhados e mínimos negritados.

Os resultados mostram a dependência da interação entre transmitância térmica e sombreamento. Os menores consumos energéticos dependem da combinação de menor transmitância térmica e maior sombreamento.

A transmitância térmica mostra-se comparativamente mais importante na redução de consumo energético que a opção de sombreamento parcial. O nível 1 de transmitância térmica com a opção sombreamento parcial apresenta um menor consumo energético que o nível 2 de transmitância térmica com a opção sombreamento completo. Este fato é parte de um padrão que se repete para cada nível de transmitância térmica. Em todos os casos, o consumo energético da opção sombreamento parcial com uma dada transmitância térmica, é menor que o consumo energético do nível maior de transmitância térmica seguinte com a opção sombreamento completo.

Na climatização artificial a temperatura interna varia entre 21 °C e 24 °C. Em Belém, estes valores são frequentemente menores que os valores da temperatura externa. Verifica-se, portanto,

virtualmente ao longo do ano todo, uma transmissão de calor do exterior para o interior. Quanto maior a transmissão de calor, maior o consumo energético para manter a temperatura interna dentro do intervalo de controle. Quanto menor a transmitância térmica, menor a transmissão de calor e menor o consumo energético. O ganho adicional de calor, devido da opção sombreamento parcial, é anulado pela menor transmitância térmica, visto que o problema transcende os ganhos por calor solares. Uma vez que a temperatura interna é inferior à externa, a menor transmitância térmica ajuda a reduzir o consumo energético durante o período noturno assim como o diurno.

A importância do consumo energético noturno explica, também, o aumento da diferença de consumo energético entre opção sombreamento parcial e sombreamento completo do nível com maior transmitância térmica seguinte. Reduzidas transmitâncias térmicas agem como um sombreamento virtual de parede. Se os ganhos solares fossem determinantes, com aumento da transmitância térmica, seria de esperar que o consumo energético da opção sombreamento parcial se aproximasse (ou ultrapassasse) do consumo energético do maior nível de transmitância térmica seguinte com a opção sombreamento completo. No entanto, a diferença entre os consumos energéticos, cresce com o aumento da transmitância térmica. Com o aumento de transmitância térmica, aumenta igualmente a transmissão de calor do exterior para o interior à noite, provocando um maior consumo energético.

Para níveis de transmitância térmica iguais, verifica-se que a opção sombreamento completo apresenta o menor consumo energético, seguida da opção sombreamento parcial tendo a opção sombreamento nulo o maior consumo energético.

A diferença entre os consumos energéticos anuais das opções sombreamento completo e parcial (para transmitâncias térmicas iguais) cresce com o aumento da transmitância térmica. A diferença é negligenciável no nível 1 de transmitância térmica de 2744 kWh para 2772 kWh, respectivamente. No entanto, a diferença aumenta para o nível 6 de transmitância térmica, com um consumo energético de 4973 kWh para 6551 kWh, respectivamente. Este fato, decorre da capacidade de baixas transmitâncias térmicas atuarem como substituto do sombreamento de parede.

Por sua vez, o sombreamento de áreas transparente mostra-se significativo mesmo comparando níveis de transmitância térmica diferente. A opção sombreamento nulo com o nível 1 de transmitância

térmica tem um consumo energético anual de 4580 kWh. Este valor aproximadamente somente 400 kWh menor que o consumo energético anual 4973 kWh do nível 6 de transmitância térmica com a opção sombreamento completo. Este resultado mostra que o sombreamento de áreas transparentes tem um impacto significativo no consumo energético anual, mesmo para baixas transmitâncias, embora entre as opções de sombreamento completo e parcial a influência do sombreamento seja secundária. A falta de sombreamento das áreas transparentes, leva ao aumento de calor no interior da Eko House. Independentemente do nível de transmitância térmica, este calor adicional só pode ser extraído pela climatização artificial, que mantém a temperatura interna abaixo da externa, impedindo o fluxo de calor para o exterior. Todo o calor extra resulta então um maior consumo energético da climatização artificial.

Com a climatização artificial, não se verifica maior ganho de calor interno para as menores transmitâncias térmicas e sim nas maiores. Este fato é comprovado pelo menor consumo energético da opção sombreamento nulo para as menores transmitâncias térmicas. Como a temperatura interna é mantida nos mesmos limites para todas as opções, a diferença entre temperatura externa e interna é igual em todos os casos.

Com maiores transmitâncias térmicas ocorre um maior fluxo de calor. O aumento de temperatura das superfícies externas através da irradiação solar (que é igual para todos os níveis de transmitância térmica na opção sombreamento nulo) provoca um maior aumento da temperatura das superfícies internas, resultando em um maior consumo energético. Adicionalmente, a transmissão de calor do ar externo para o ar interno também é maior para as maiores transmitâncias térmicas resultando também em maior consumo energético. As cargas internas não têm influência neste resultado, uma vez que são iguais para todos os casos.

Na climatização natural, ao contrário da ventilação natural automática, existe um fluxo unidirecional constante de calor, de fora para dentro. Maiores quantidades de calor, não alteram a direção do fluxo de calor dada a manutenção da temperatura interna. A variação das cargas internas não altera a direção do fluxo de calor, somente o consumo energético. Desta forma, quanto menor a transmitância térmica menor o calor ganho. O diferencial de temperatura é igual em todos os casos, os casos com menores transmitância térmicas recebem menos calor e resultando em menores consumo energéticos.

#### 4.2.2 Primeira etapa da climatização artificial em Curitiba

O menor consumo energético anual tem o valor de 1525 kWh e ocorre com a opção sombreamento completo e nível 1 de transmitância térmica. O maior consumo energético anual tem o valor de 5793 kWh ocorre com a opção sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica. A Tabela 57 apresenta os resultados da primeira etapa.

Tabela 57: Comparação dos consumos energéticos anuais de climatização artificial em Curitiba.

| Opção de sombreamento | Nível 1 [kWh] | Nível 2 [kWh] | Nível 3 [kWh] | Nível 4 [kWh] | Nível 5 [kWh] | Nível 6 [kWh] |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Sombreamento completo | 1525          | 1580          | 1780          | 2642          | 3086          | 3911          |
| Sombreamento parcial  | 1531          | 1616          | 1849          | 2767          | 3268          | 4498          |
| Sombreamento nulo     | 2799          | 2805          | 2923          | 3744          | 4508          | 5793          |

Máximos anuais sublinhados e mínimos negritados.

O clima de Curitiba apresenta uma necessidade preponderante de aquecimento, com períodos significativos com necessidade de refrigeração. Como a climatização artificial mantém a temperatura entre 21 °C e 24 °C, tal fato implica que as temperaturas externas estão frequentemente abaixo de 21 °C ou acima de 24 °C. Desta forma, o fluxo de calor entre o exterior e interior, alterna da Eko House para o exterior, nos períodos de frio e do exterior para a Eko House nos períodos de calor.

Para a climatização artificial, a transmitância térmica é o principal determinante do consumo energético. Note-se, que para todos os casos, tal como para Belém, o consumo energético de um nível de transmitância térmica com a opção sombreamento parcial é menor que o consumo energético do nível de transmitância térmica seguinte com a opção sombreamento completo.

Também como em Belém, quanto menor a transmitância térmica, menor a troca de calor entre interior e exterior, visto o diferencial entre temperaturas internas e externas é igual para todos os casos. Menores transmitâncias térmicas resultam em menores fluxos de calor e, conseqüentemente, menores consumos energéticos. O fato de em Curitiba o fluxo de oscilar nos entre dois sentidos (de

dentro para fora, nos períodos de aquecimento, e de fora para dentro nos períodos de refrigeração) não altera este fato.

O clima de Curitiba apresenta acentuadas amplitudes térmicas, sazonais e diárias apesar do predomínio de graus hora de frio. Dessa forma, uma opção de sombreamento pode, consecutivamente, aumentar ou reduzir o consumo energético. Por exemplo, opção sombreamento nulo permite maiores ganhos por irradiação solar, que pode reduzir o consumo energético durante períodos quando o aquecimento é necessário. No entanto, os ganhos por irradiação solar podem aumentar o consumo energético nos períodos quando a refrigeração é necessária.

Dado o predomínio de graus hora de frio, seria de esperar, dada a preponderância de graus hora de frio, que a opção sombreamento nulo apresenta-se os menores consumos energéticos. No entanto, para níveis de transmitância térmica iguais, verifica-se que a opção sombreamento completo apresenta o menor consumo energético, seguida da opção sombreamento parcial tendo a opção sombreamento nulo o maior consumo energético.

Este resultado pode parecer contra intuitivo. Para analisar a climatização artificial em Curitiba, a Tabela 58 discrimina os consumos energéticos por ventilação, aquecimento e refrigeração.

Tabela 58: Discriminação dos consumos energéticos anuais do sistema climatização artificial em Curitiba

| Enve-<br>lope | Subsistema   | Sombreamento      | Sombreamento     | Sombreamento  |
|---------------|--------------|-------------------|------------------|---------------|
|               |              | completo<br>[kWh] | parcial<br>[kWh] | nulo<br>[kWh] |
| Nível 1       | Ventiladores | 843               | 852              | 1589          |
|               | Aquecimento  | 488               | 476              | 82            |
|               | Refrigeração | 194               | 204              | 1134          |
| Nível 2       | Ventiladores | 863               | 905              | 1593          |
|               | Aquecimento  | 532               | 494              | 101           |
|               | Refrigeração | 185               | 217              | 1105          |
| Nível 3       | Ventiladores | 968               | 1042             | 1708          |
|               | Aquecimento  | 632               | 578              | 182           |
|               | Refrigeração | 181               | 228              | 1034          |
| Nível 4       | Ventiladores | 1336              | 1460             | 2201          |
|               | Aquecimento  | 1132              | 1039             | 678           |
|               | Refrigeração | 174               | 267              | 865           |
| Nível 5       | Ventiladores | 1498              | 1661             | 2593          |
|               | Aquecimento  | 1399              | 1256             | 1009          |
|               | Refrigeração | 190               | 352              | 906           |
| Nível 6       | Ventiladores | 1735              | 2228             | 3223          |
|               | Aquecimento  | 1932              | 1714             | 1489          |
|               | Refrigeração | 245               | 556              | 1081          |

Para baixas transmitâncias térmicas, o ganho de calor por irradiação solar facilmente eleva a temperatura interna acima do limite do intervalo de controle de temperatura, provocando um consumo energético adicional de refrigeração. Este consumo adicional ultrapassa a redução no consumo energético de aquecimento. Como exemplo, compare-se o consumo energético de aquecimento para a opção sombreamento nulo do nível 1 (82 kWh) com os consumos energéticos das opções sombreamento completo e parcial (488 kWh e 476 kWh, respectivamente).

No entanto, a redução no consumo energético de aquecimento e ultrapassada pelo aumento do consumo energético de refrigeração e, também, ventilação. O aumento da ventilação é provocado não só pelo aumento do consumo de refrigeração, mas pela velocidade com que o mesmo ocorre. A irradiação solar pode aumentar a temperatura

mais rapidamente que a condução térmica através do envelope da Eko House. Este fato obriga a mover maiores volumes de ar em menor tempo para manter a temperatura interna dentro dos limites do intervalo de controle, aumentando o consumo energético de ventilação além da unidade condicionadora de refrigeração.

Para transmitâncias térmicas maiores, a redução no consumo energético em aquecimento (comparando a opção sombreamento nulo com as opções sombreamento completo e parcial) não compensa o aumento do consumo energético em refrigeração.

O consumo energético da ventilação aumenta com a transmitância térmica para todas as opções de sombreamento. Quanto maior a transmitância térmica, maiores as trocas de calor entre interior e exterior, resultando na necessidade de transferência de maiores quantidades de calor que, obrigam à movimentação de maiores volumes de ar, aumentando o consumo energético de ventilação.

Verifica-se também um terceiro efeito que decorre do modo de funcionamento da climatização artificial. Em Curitiba, a rigor, existem dois subsistemas de climatização artificial, um para aquecimento outro para refrigeração. Quando um destes subsistemas funciona o outro é desligado até ser necessário. A eficiência de cada um destes subsistemas é maior quando funcionam em regime permanente, em operação contínua com a menor variação de temperatura possível. Embora o sistema de fluido de refrigerante variável mitigue a necessidade de desligamento e religamento, não as impede totalmente, quando as necessidades de climatização alternam entre aquecimento e refrigeração. Em Curitiba, as amplitudes térmicas apresentam extensão suficiente para que ambos os subsistemas operem no mesmo dia. Esse fato explica o menor consumo energético em refrigeração ocorra para o nível 4 de transmitância térmica ao invés do nível 1 de transmitância térmica, ambos com a opção sombreamento completo. Para o nível 4 de transmitância térmica raramente é necessária refrigeração, resultando um consumo energético menor.

### 4.3 SEGUNDA ETAPA DA VENTILAÇÃO NATURAL AUTOMÁTICA

#### 4.3.1 Segunda etapa da ventilação natural automática em Belém

A Tabela 59 compara o desempenho em graus hora das primeira e segunda etapa da ventilação natural automática em Belém.

Tabela 59: Comparação dos desempenhos da ventilação natural automática entre a primeira e segunda etapa para Belém

| Etapa     | Primeira etapa | Segunda Etapa |
|-----------|----------------|---------------|
| Data      | [Graus hora]   | [Graus hora]  |
| Janeiro   | 8              | 1994          |
| Fevereiro | 0              | 298           |
| Março     | 0              | 69            |
| Abril     | 0              | 4             |
| Maiο      | 0              | 40            |
| Junho     | 0              | 29            |
| Julho     | 0              | 23            |
| Agosto    | 0              | 24            |
| Setembro  | 0              | 11            |
| Outubro   | 0              | 10            |
| Novembro  | 0              | 14            |
| Dezembro  | 0              | 9             |
| Total     | 8              | 2525          |

A comparação mostra um aumento muito significativo nos graus hora de desconforto térmico. Este resultado reforça a importância extrema do sombreamento correto em Belém. O nível 2 é o modelo com a segunda menor transmitância térmica entre os seis níveis. Um sombreamento inadequado resulta rapidamente em um acúmulo elevado de calor. Dessa forma, fica claro que usar o limite inferior um limite inferior da banda de aceitabilidade mensal da ASHRAE 55 2010, como temperatura de controle, não é suficiente para evitar sobreaquecimento.

### 4.3.2 Segunda etapa da ventilação natural automática em Curitiba

A segunda etapa altera os parâmetros de simulação do sombreamento utilizados na primeira etapa, sendo aplicável às opções sombreamento completo e parcial. Uma vez que a opção sombreamento nulo obteve a menor soma anual de graus hora na primeira etapa, não é feita nenhuma simulação para a segunda etapa da ventilação natural automática em Curitiba.

## 4.4 SEGUNDA ETAPA DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL

### 4.4.1 Segunda etapa da climatização artificial em Belém

As variações entre os consumos energéticos do fluxo variável de refrigerante da primeira e segunda etapas foram desprezíveis, com um consumo energético anual na segunda etapa de 2712 kWh comparado com 2744 kWh na primeira etapa.

### 4.4.2 Segunda etapa da climatização artificial em Curitiba

A Tabela 60 discrimina os consumos energéticos anuais de ventilação, aquecimento e refrigeração para o menor consumo energético anual da primeira etapa e o consumo energético anual correspondente na segunda etapa.

Tabela 60: Discriminação dos consumos energéticos anuais de climatização artificial na primeira e segunda etapas em Curitiba.

| Consumo<br>Etapa | Ventiladores<br>[kWh] | Aquecimento<br>[kWh] | Refrigeração<br>[kWh] | Total<br>[kWh] |
|------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| 1                | 843                   | 488                  | 194                   | 1525           |
| 2                | 828                   | 426                  | 219                   | 1473           |

A alteração do algoritmo de sombreamento que destinge a primeira da segunda etapa reduziu ligeiramente o consumo energético anual da climatização natural em Curitiba. Ao aumentar a incidência de irradiação solar nas áreas transparentes, a segunda etapa mostra um aumento do consumo energético anual em refrigeração. No entanto, o aumento da incidência de irradiação solar nas áreas transparentes também reduziu o consumo energético anual de aquecimento e de ventilação, resultando num consumo energético anual total menor que na primeira etapa. Este resultado decorre é esperado dada a maior necessidade de aquecimento em Curitiba. O

aquecimento maior provocado pela a irradiação solar maior nas áreas transparentes compensa assim o aumento no consumo energético de refrigeração.

#### 4.5 TERCEIRA ETAPA DA VENTILAÇÃO NATURAL AUTOMÁTICA

##### 4.5.1 Terceira etapa da ventilação natural automática em Belém

A terceira etapa da ventilação natural automática em Belém apresentou uma soma anual de graus hora de 1239 e 1225 para o intervalo de temperatura de controle de  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A Tabela 61 apresenta os resultados mensais e anual.

Tabela 61: Comparação de somas de graus hora mensais e anual entre a entre as três etapas para a ventilação natural automática em Belém

| Etapa     | Segunda etapa | Terceira etapa abertura $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Terceira Etapa abertura $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
|-----------|---------------|--|--|
| Data      | [Graus hora]  | [Graus hora]   | [Graus hora]   |
| Janeiro   | 1994          | 289  | 289  |
| Fevereiro | 298           | 133  | 133  |
| Março     | 69            | 89   | 89   |
| Abril     | 4             | 14   | 14   |
| Mai       | 40            | 103  | 103  |
| Junho     | 29            | 96   | 92   |
| Julho     | 23            | 98   | 96   |
| Agosto    | 24            | 105  | 103  |
| Setembro  | 11            | 90   | 88   |
| Outubro   | 10            | 84   | 82   |
| Novembro  | 14            | 93   | 92   |
| Dezembro  | 9             | 47   | 46   |
| Total     | 2525          | 1239   | 1225   |

A temperatura de controle de abertura das áreas transparentes (áreas de ventilação), na etapa 3, varia mensalmente de acordo com o modelo de conforto térmico adaptativo da ASHRAE 55 2010, ao invés de ser fixa em  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta alteração de provoca uma redução de soma anual de graus hora de aproximadamente 1000 graus hora. A alteração se dá principalmente pela redução de muito sensível de graus hora no mês de janeiro e fevereiro, pois em outros meses os graus hora aumentam. Os resultados mostram que pequenas alterações nas

temperaturas de controle de abertura de áreas transparentes induzem variações consideráveis nas somas mensais de graus hora. Estas alterações decorrem da baixa transmitância térmica e baixa infiltração de ar, que, em Belém, podem provocar sobreaquecimento com facilidade.

#### **4.5.2 Terceira etapa da ventilação natural automática em Curitiba**

A terceira etapa da ventilação natural automática em Curitiba apresenta dois conjuntos de temperaturas de controle para abertura das áreas transparentes (áreas de ventilação). As temperaturas de controle variam mensalmente, sendo definidas adicionando 2,5 °C e 3,5 °C à temperatura mensal de referência do modelo adaptativo da ASHRAE 55 2010. O conjunto de temperaturas 2,5 °C apresentou o valor de soma de graus hora de 2036 e o conjunto de temperatura 3,5 °C o valor de 2149.

A Tabela 62 apresenta as somas mensais de graus hora mensais e anuais da terceira etapa comparando-as com os resultados da primeira etapa (a segunda etapa não é aplicável para a ventilação natural automática em Curitiba).

Tabela 62: Somas mensais e anuais de graus hora da primeira e terceira etapa da ventilação natural automática em Curitiba

| Etapa     | Primeira etapa<br>[Graus hora] |      | Terceira Etapa +2,5 °C<br>[Graus hora] |      | Terceira Etapa +3,5 °C<br>[Graus hora] |      |
|-----------|--------------------------------|------|--|------|--|------|
|           | Calor                          | Frio | Calor                                  | Frio | Calor                                  | Frio |
| Janeiro   | 120                            | 0    | 122                                    | 0    | 159                                    | 0    |
| Fevereiro | 54                             | 0    | 68                                     | 0    | 102                                    | 0    |
| Março     | 30                             | 0    | 39                                     | 0    | 63                                     | 0    |
| Abril     | 10                             | 14   | 13                                     | 9    | 23                                     | 8    |
| Maiο      | 5                              | 303  | 7                                      | 294  | 15                                     | 280  |
| Junho     | 0                              | 583  | 0                                      | 581  | 0                                      | 572  |
| Julho     | 4                              | 85   | 4                                      | 84   | 6                                      | 64   |
| Agosto    | 69                             | 189  | 69                                     | 188  | 84                                     | 180  |
| Setembro  | 61                             | 169  | 62                                     | 165  | 66                                     | 151  |
| Outubro   | 140                            | 32   | 141                                    | 32   | 158                                    | 28   |
| Novembro  | 9                              | 0    | 10                                     | 0    | 18                                     | 0    |
| Dezembro  | 139                            | 0    | 148                                    | 0    | 170                                    | 0    |
| Subtotal  | 641                            | 1374 | 683                                    | 1354 | 865                                    | 1284 |
| Total     | 2016                           |      | 2036                                   |      | 2149                                   |      |

Comparando os diversos resultados, nota-se que a alteração das temperaturas de controle teve um efeito reduzido nas somas anuais de graus hora de calor e frio. No entanto, note-se que as temperaturas de controle são um pouco superiores da temperatura de controle da primeira etapa (25 °C). No entanto, essas pequenas diferenças têm impactos se analisados as somas de graus hora de calor ou de frio. Temperaturas mais elevadas de abertura das áreas transparentes provocam um aumento dos graus hora de calor, mas uma diminuição dos graus hora de frio. O conjunto de temperaturas de controle 3,5 °C, apresenta a menor soma anual de graus hora de frio, seguindo-se o conjunto de temperaturas de controle 2,5 °C e finalmente a primeira etapa. No entanto, a redução dos graus hora de frio, foi ultrapassada, para ambos os conjuntos de temperaturas de controle, pelo aumento

dos graus horas de calor, resultando em somas anuais de graus hora de calor e frio maiores.

Este fato reforça a dificuldade atender às demandas opostas de calor e frio em Curitiba. Em contrapartida a Belém, onde só tendo que atender a uma demanda (calor) não é necessário ter em conta os efeitos contrários no aumento de graus hora de frio.

#### 4.6 TERCEIRA ETAPA DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL

##### 4.6.1 Recuperação de calor sensível e latente em Belém

Esta sessão apresenta o desempenho do sistema de recuperação de calor sensível e latente. Este sistema acrescenta à climatização artificial, a recuperação de calor sensível e latente que pré-aquece ou pré-resfria o ar de renovação do exterior antes de entrar na zona climatizada.

Com a recuperação de calor sensível e latente o menor consumo energético anual para Belém teve o valor de 3523 kWh e o maior o valor de 3970 kWh. A Tabela 63 apresenta os resultados para Belém.

Tabela 63: Consumos totais de climatização com recuperação de calor sensível e latente de ventilação para Belém

| Taxa de infiltração             | 0,6 [ach] | 1,2 [ach] | 1,8 [ach] |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Taxa de renovação do ar interno | [kWh]     | [kWh]     | [kWh]     |
| 0,6 [ach]                       | 3523      |           |           |
| 1,2 [ach]                       | 3581      | 3733      |           |
| 1,8 [ach]                       | 3656      |           | 3970      |

A Tabela 63 relaciona os consumos energéticos com a taxa de infiltração e taxa de ventilação. O menor consumo energético ocorre com as menores taxas de infiltração e ventilação como pode ser visto na Tabela 63. O consumo energético tem maior aumento com o aumento da taxa de infiltração comparado com a taxa de ventilação.

Maiores volumes de ar trocados entre interior e exterior implicam maiores trocas de calor. Uma taxa de renovação mecânica do ar interno 1,8 ach com 0,6 ach de infiltração apresenta um menor consumo que uma infiltração 1,2 ach com taxa de renovação mecânica de ar interno de 1,2 ach, embora a soma total das trocas de ar tenha o mesmo valor de 2,4 ach. A renovação mecânica do ar interno é conduzida através da recuperação de calor sensível e latente, ao

contrário do ar trocado por infiltração que apresenta assim maiores consumos energéticos.

Embora este fato demonstre o impacto da recuperação de calor, este impacto não é suficiente para reduzir o consumo de energia de climatização comparado com o menor consumo da etapa 2 com o valor de 2712 kWh por ano.

A Tabela 64 apresenta o consumo energético total do sistema de climatização, discriminando entre ventiladores, unidade condicionadoras e recuperador de calor sensível e latente. São incluídos na tabela os consumos de ventilador e unidade condicionadora com menor consumo de climatização artificial da precedente segunda etapa para efeitos de comparação.

Tabela 64: Discriminação dos consumos de climatização por componentes.

| Consumo energético<br>Taxa renovação / taxa de infiltração | Ventiladores [kWh] | Unidade condicionadora de refrigeração [kWh] | Recuperação de calor [kWh] | Total [kWh] |
|--|--------------------|--|----------------------------|-------------|
| 0,6 ach / 0,6 ach  | 810                | 1892   | 820                        | 3523        |
| 0,6 ach / 1,2 ach  | 830                | 1931   | 820                        | 3581        |
| 1,2 ach / 1,2 ach  | 848                | 1988   | 820                        | 3656        |
| 0,6 ach / 1,8 ach  | 883                | 2030   | 820                        | 3733        |
| 1,8 ach / 1,8 ach  | 956                | 2193   | 820                        | 3970        |
| Etapa 2  | 745                | 1967   |                            | 2712        |

Não se verificou consumo energético de aquecimento em nenhum caso.

O consumo energético anual da unidade condicionadora com recuperação de calor sensível e latente (1892 kWh) reduz ligeiramente quando comparado com o menor consumo energético anual da segunda etapa (1967 kWh). No entanto, o consumo energético total do sistema com recuperação de calor sensível e latente é mais de 800 kWh superior. O consumo energético anual total dos sistemas inclui os consumos dos ventiladores. Comparando, o consumo energético anual dos ventiladores da segunda etapa (745 kWh) é ligeiramente menor que o consumo energético anual dos ventiladores do sistema de recuperação de calor sensível e latente. Uma vez que o sistema de recuperação de calor sensível e latente tem mais um ventilador este resultado é coerente.

A Tabela 64 apresenta o consumo energético anual dos ventiladores agregado, não permitindo uma análise separada por ventilador. A Tabela 65 apresenta o consumo energético anual discriminado dos seis ventiladores. O sistema completo de climatização apresenta três ventiladores por zona térmica (um do sistema de fluido variável de refrigerante mais dois para a recuperação de calor sensível e latente) perfazendo um total de seis ventiladores. O sistema de recuperação de calor precisa de ventiladores de entrada e saída para manter a pressão balanceada. O consumo energético anual dos ventiladores do sistema de fluido variável de refrigerante do melhor desempenho da segunda etapa é apresentado igualmente para comparação.

Tabela 65: Discriminação dos consumos energéticos dos ventiladores do sistema de recuperação de calor em Belém

| Ventiladores                         | Fluido variável de refrigerante |              | Recuperação de calor sensível e latente |              |              |              | Total [kWh] |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------|---|--------------|--------------|--------------|-------------|
|                                      | Entrada de ar                   |              | Entrada de ar                           |              | Saída de ar  |              |             |
|                                      | Zona 1 [kWh]                    | Zona 2 [kWh] | Zona 1 [kWh]                            | Zona 2 [kWh] | Zona 1 [kWh] | Zona 2 [kWh] |             |
| Taxa renovação / taxa de infiltração |                                 |              |   |              |              |              |             |
| 0,6 ach /0,6                         | 728                             | 27           | 25                                      | 2            | 25           | 2            | 810         |
| 0,6 ach/1,2 ach                      | 745                             | 29           | 26                                      | 2            | 26           | 2            | 830         |
| 1,2 ach/1,2 ach                      | 745                             | 29           | 51                                      | 4            | 51           | 4            | 883         |
| 0,6 ach/1,8 ach                      | 761                             | 30           | 26                                      | 2            | 26           | 2            | 848         |
| 1,8 ach/1,8 ach                      | 761                             | 30           | 76                                      | 6            | 76           | 6            | 956         |
| Etapa 2                              | 719                             | 27           |   |              |              |              | 745         |

O maior item de consumo energético são os ventiladores do sistema de fluido variável de refrigerante. A adição da recuperação de calor sensível e latente ao sistema fluido variável de refrigerante aumenta o consumo energético anual dos ventiladores. O aumento do consumo energético dos ventiladores varia de 50 kWh a mais de 150 kWh por ano. Saliente-se que consumo total obtido através da soma dos consumos individuais dos ventiladores (Tabela 65) resultou em valores ligeiramente distintos dos apresentados na Tabela 64. Esta discrepância é resultado de diferença de arredondamento na apresentação de relatórios no EnergyPlus.

A comparação entre as Tabela 64 e Tabela 65 permite discriminar os consumos dos diversos componentes do sistema de recuperação de calor sensível e latente. Este sistema é composto pelo recuperador de calor mais os quatro ventiladores. Comparando o consumo energético do sistema como um todo (Tabela 64) com o consumo energético dos quatro ventiladores (Tabela 65) conclui-se que a maior parcela do consumo energético ocorre no próprio recuperador de calor. A potência máxima do recuperador de calor sensível e latente é de 50 W. Esta potência é igual para a opção roda entálpica (*rotary*) e de placa (*plate*) pois o EnergyPlus assume a mesma demanda para ambos os casos, mesmo perante o fato de a roda entálpica necessitar de energia para se manter em rotação, em contrapartida ao recuperador de placa, que não tem partes móveis.

Como forma de aferir os efeitos de um sistema de recuperação de calor sensível e latente mais eficiente, foi feita uma nova simulação para o modelo 0,6 ach de renovação mecânica de ar e 0,6 ach de infiltração com o recuperador de calor sensível e latente com demanda máxima de 5 W, dez vezes menor que a demanda padrão (*default*) do EnergyPlus.

A Tabela 66 apresenta o resultado e comparado com o menor consumo da segunda etapa do sistema de fluido variável de refrigerante para Belém. Mesmo admitindo uma demanda máxima do recuperador de calor sensível e latente dez vezes menor, o consumo energético total anual deste sistema continua superior ao menor consumo energético anual do sistema de fluido variável de refrigerante da segunda etapa para Belém.

Tabela 66: Consumo de climatização com demanda reduzida de recuperador de calor sensível e latente

| Sistema  | Consumo Total de climatização [kWh] |
|--|-------------------------------------|
| Taxa de renovação mecânica do ar externo 0,6 ach com demanda máxima de 5 W           | 2949                                |
| Menor consumo sistema de fluido variável de refrigerante da segunda etapa para Belém | 2712                                |

Tal valor colocam o consumo energético anual do sistema com recuperação de calor sensível e latente aproximadamente 9% maior que o menor consumo energético anual sistema de fluido variável de refrigerante na segunda etapa.

A literatura aponta que a parametrização errada de um sistema recuperação de calor sensível e latente pode aumentar o consumo até 5% (RASOULI et al., 2010, 2013; TREADO e LIU 2013). A limitação do modelo sistema de fluido variável de refrigerante no EnergyPlus de forçar a simulação do sistema de fluido variável de refrigerante com recuperação de calor sensível e latente como dois sistemas paralelos, ao invés de em série, resulta em uma duplicação de ventiladores de entrada do ar na zona e menor integração na operação conjunta dos dois sistemas.

Treado; Liu (2013) obtiveram uma redução de 15% no consumo energético anual de climatização através da aplicação de um sistema de recuperação de calor sensível e latente. Os autores obtiveram este valor para Miami, que, embora seja um clima quente e úmido, apresenta condições distintas do clima equatorial de Belém. Assumindo, no entanto, uma redução de 15% no consumo de climatização com aplicação de recuperação de calor sensível e latente comparado com a não aplicação, pode-se assumir um valor de 2305 kWh de consumo pare uma aplicação ideal da recuperação de calor sensível e latente a um sistema de fluido variável de refrigerante.

#### 4.6.2 Intervalo de controle adaptativo em Belém

A Tabela 67 mostra que o consumo energético anual do sistema fluido de refrigerante variável para Belém com intervalo de controle adaptativo com 80% de aceitabilidade (810 kWh) é menor comparando com os consumos energéticos da primeira e segunda etapa.

Tabela 67: Comparação entre consumos energéticos nas três etapas para fluido de refrigerante variável em Belém

| <u>Etapa</u><br><u>Cidade</u> | Primeira<br>[kWh] | Segunda<br>[kWh] | Terceira (ASHRAE 80%)<br>[kWh] |
|-------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|
| Belém                         | 2744              | 2712             | 810                            |

O uso intervalo de controle adaptativo ilustra o potencial de redução de consumo energético anual de ter limites superiores e inferiores da temperatura de controle que seguem as variações temperatura externa para apresentar valores mais próximos da mesma. Uma vez que o intervalo de temperatura de controle de 21 °C a 24 °C utilizado na primeira e segunda etapa era frequentemente distante das temperaturas externas, a aproximação do limite superior de controle de temperatura na terceira etapa permitiu uma redução de consumo energético anual de quase 2000 kWh.

#### 4.6.3 Recuperação de calor sensível e latente em Curitiba

Em Curitiba, a recuperação de calor sensível e latente o menor consumo energético anual teve o valor de 2194 kWh e o maior o valor de 2434 kWh. A Tabela 68 apresenta os resultados para Curitiba.

Tabela 68: Consumos totais de climatização com recuperação de calor sensível e latente de ventilação para Curitiba.

| Taxa de infiltração             | 0,6   | 1,2   | 1,8   |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Taxa de renovação do ar interno | [ach] | [ach] | [ach] |
| 0,6 [ach]                       | 2194  |       |       |
| 1,2 [ach]                       | 2222  | 2278  |       |
| 1,8 [ach]                       | 2250  |       | 2435  |

A relação entre infiltração, renovação mecânica do ar interno é a mesma verificada em Belém: o menor consumo energético ocorre com a menor taxa de infiltração e renovação mecânica do ar interno.

A Tabela 69 apresenta a discriminação do consumo energético anual do conjunto dos ventiladores, das unidades condicionadoras de aquecimento e refrigeração (em agregado e separadamente) e da recuperação de calor para Curitiba. Os resultados mostram que o consumo de energia em climatização em agregado, aumenta com as trocas de ar.

Tabela 69: Discriminação dos consumos de climatização por componentes para Curitiba.

| <u>Consumo energético</u>    | Aquecimento [kWh] | Refrigeração [kWh] | Subtotal [kWh] | Ventiladores [kWh] | Recuperação de calor [kWh] | Total [kWh] |
|------------------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| Taxas                        |                   |                    |                |                    |                            |             |
| Renovação/ Infiltração [ach] |                   |                    |                |                    |                            |             |
| 0,6 /0,6                     | 469               | 168                | 637            | 772                | 785                        | 2194        |
| 0,6 /1,2                     | 486               | 167                | 653            | 784                | 785                        | 2222        |
| 1,2 /1,2                     | 602               | 66                 | 668            | 826                | 785                        | 2278        |
| 0,6 /1,8                     | 503               | 167                | 670            | 796                | 785                        | 2250        |
| 1,8/1,8                      | 684               | 63                 | 747            | 904                | 785                        | 2435        |
| Etapa 2                      | 426               | 219                | 645            | 828                | 0                          | 1473        |

Os dados apontam uma divergência entre os desempenhos das unidades condicionadoras de aquecimento e refrigeração. No total, o consumo energético das unidades condicionadoras de aquecimento e refrigeração aumenta com trocas de ar., no entanto, o consumo da unidade condicionadora de refrigeração reduz-se com o aumento das trocas de ar. Este consumo reduz-se ligeiramente com o aumento da infiltração e expressivamente com o aumento da taxa de renovação mecânica de ar. Este resultado indica sobreaquecimento. Se o aumento da taxa de infiltração reduz, mesmo que ligeiramente, o consumo anual energético de refrigeração, tal implica que existem momentos que a maior troca de ar com exterior está permitindo perder calor. Para isto acontecer, é necessário que o aumento da temperatura interna esteja ligado a geração interna de calor, que as maiores trocas de ar por infiltração auxiliam a perder. Esta perda reduz por sua vez o consumo energético no agregado anual. Isto não quer dizer que em todas as vezes a temperatura externa seja menor que a interna, mas que os efeitos dos momentos em que tal ocorre são suficientes para redução do consumo energético anual de refrigeração. Com recuperação de calor este efeito é aumentado, visto que nos momentos

em que a temperatura do ar externo é maior que a do ar interno, o ar externo que entra é pré-refrigerado, implicando em menores consumos energéticos.

Em contrapartida, o consumo energético da unidade condicionadora de aquecimento aumenta com as trocas de ar. O aumento do consumo energético ocorre quer perante maiores da taxa de infiltração, quer perante maiores taxas de renovação de ar. O aumento de consumo de energia na unidade condicionadora de aquecimento é menor perante maiores taxas de renovação mecânica do ar de que perante maiores taxas de infiltração dado que o pré-aquecimento do ar externo que entra para renovação de ar.

A Tabela 70 apresenta os consumos energéticos anuais de cada um dos seis ventiladores em Curitiba. Os ventiladores 1 pertencem ao sistema de fluido variável de refrigerante para a zona 1 e 2. Os ventiladores 2 e 3 pertencem à recuperação de calor sensível e latente nas zonas 1 e 2.

Tabela 70: Discriminação de consumo energético individual de ventiladores para Curitiba.

| Ventiladores                       | Fluido variável de refrigerante |              | Recuperação de calor sensível e latente |              |              |              | Total [kWh] |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------|---|--------------|--------------|--------------|-------------|
|                                    | Entrada de ar                   |              | Entrada de ar                           |              | Saída de ar  |              |             |
|                                    | Zona 1 [kWh]                    | Zona 2 [kWh] | Zona 1 [kWh]                            | Zona 2 [kWh] | Zona 1 [kWh] | Zona 2 [kWh] |             |
| Taxas Renovação/ Infiltração [ach] |                                 |              |   |              |              |              |             |
| 0,6 /0,6                           | 694                             | 22           | 26                                      | 26           | 2            | 2            | 772         |
| 0,6 /1,2                           | 694                             | 22           | 51                                      | 51           | 4            | 4            | 826         |
| 1,2 /1,2                           | 694                             | 22           | 51                                      | 51           | 4            | 4            | 826         |
| 0,6 /1,8                           | 715                             | 24           | 26                                      | 26           | 2            | 2            | 796         |
| 1,8/1,8                            | 715                             | 24           | 76                                      | 76           | 6            | 6            | 904         |
| Etapa 2                            | 812                             | 1            |   |              |              |              | 813         |

Tal como para Belém, a maior parcela do consumo advém dos ventiladores do sistema de fluido variável de refrigerante.

A comparação entre as Tabela 69 e Tabela 70 permite discriminar os consumos dos diversos componentes do sistema de recuperação de calor sensível e latente. Este sistema é composto pelo recuperador de calor mais os quatro ventiladores. Comparando o consumo energético do sistema como um todo (Tabela 69) com o

consumo energético quatro ventiladores (Tabela 70) conclui-se que a maior parcela do consumo energético ocorre no próprio recuperador de calor. A potência máxima do recuperador de calor sensível e latente é de 50 W. Como forma de aferir os efeitos da recuperação de calor sensível e latente mais eficiente, foi feita uma nova simulação para o modelo 0,6 ach de renovação mecânica de ar e 0,6 ach de infiltração com o recuperador de calor sensível e latente com demanda máxima de 5 W, dez vezes menor que a demanda padrão do EnergyPlus.

A Tabela 71 apresenta o resultado e comparado com o menor consumo energético anual da segunda etapa do sistema de fluido variável de refrigerante para Belém. Reduzindo em dez vezes, a potência máxima do recuperador de calor sensível e latente, o consumo energético total anual de climatização é menos de 20 kWh superior ao menor consumo energético de climatização em sistema de fluido variável de refrigerante da segunda etapa para Curitiba. Este resultado é bastante mais próximo do esperado de acordo com a bibliografia.

Tabela 71: Consumo de climatização com demanda reduzida de recuperador de calor sensível e latente

| Sistema   | Consumo Total de climatização [kWh] |
|---|-------------------------------------|
| Taxa de renovação mecânica do ar externo 0,6 ach com demanda máxima de 5 W              | 1488                                |
| Menor consumo sistema de fluido variável de refrigerante da segunda etapa para Curitiba | 1473                                |

Aplicando os melhores resultados na aplicação de recuperação de calor sensível e latente na literatura ao valor de 1473 kWh, obtém-se um valor de 1252 kWh de consumo energético para climatização em um melhor cenário teórico possível.

#### 4.6.4 Intervalo de controle adaptativo em Curitiba

A Tabela 72 mostra que o consumo energético anual do sistema fluido de refrigerante variável para Curitiba com intervalo de controle adaptativo com 80% de aceitabilidade (1039 kWh) é menor comparando com os consumos energéticos da primeira e segunda etapa.

Tabela 72: Comparação entre consumos energéticos nas três etapas para fluido de refrigerante variável em Curitiba

| Consumo energético | Primeira etapa [kWh] | Segunda etapa [kWh] | Terceira etapa 80% [kWh] |
|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|
| Curitiba           | 1525                 | 1473                | 1039                     |

A Tabela 72 mostra uma redução de consumo energético anual de 1473 kWh, na segunda etapa, para 1039 kWh com intervalo de controle adaptativo. Esta redução apresenta a mesma razão básica de Belém; a alteração dos limites do intervalo das temperaturas de controle acompanhando mais de perto as variações da temperatura externa. Este fato resulta na redução do diferencial entre temperatura externa e temperatura interna a manter resultando em menor consumo energético.

A redução é menor para Curitiba comparativamente a Belém. Várias razões explicam este fato. Em primeiro lugar, os consumos energéticos da primeira e segunda etapas em Curitiba são inferiores aos consumos energéticos anuais da primeira e segunda etapas em Belém, uma vez que as temperaturas externas em Curitiba estão mais frequentemente próximas do intervalo entre 21 °C e 24 °C. Logo, em Curitiba o intervalo 21 °C a 24 °C já se adequa mais ao clima de Curitiba resultando em menores consumo energéticos anuais. Em segundo lugar, o maior consumo energético anual em Curitiba é o de aquecimento. Como a ASHRAE 55 2010 estabelece o limite inferior de temperatura em 18 °C, o consumo energético de aquecimento não tem tanto potencial de redução, especialmente quando os mínimos de temperatura externa em Curitiba chegam perto dos 0 °C.

Dessa forma a maior parte da redução de consumo energético ocorre na refrigeração e no consumo de ventilador associado que a redução do consumo de aquecimento como mostrado na Tabela 73.

Tabela 73: Discriminação dos consumos energéticos anuais para as três etapas em Curitiba

| Consumo energético | Primeira etapa | Segunda etapa | Terceira etapa<br>80% |
|--------------------|----------------|---------------|-----------------------|
| Curitiba           | [kWh]          | [kWh]         | [kWh]                 |
| Ventiladores       | 843            | 828           | 556                   |
| Aquecimento        | 488            | 426           | 399                   |
| Refrigeração       | 194            | 219           | 85                    |
| Total              | 1525           | 1473          | 1039                  |

Em terceiro lugar, os gastos advindos dos ciclos de ligamento e desligamento dos subsistemas de aquecimento e refrigeração são reduzidos, mas não são eliminados. O sistema de aquecimento continua a ser demandado e ainda se verifica consumo energético de resfriamento, resultando nos ciclos de ligamento e desligamento que implicam em gastos energéticos maiores.

#### 4.6.5 Comparação consumos energéticos da recuperação de calor sensível e latente e operação adaptativa em Belém e Curitiba

Finalmente, resta comparar os desempenhos da recuperação de calor sensível e latente com a operação adaptativa.

Para Belém, o consumo energético anual para uma aplicação ideal da recuperação de calor sensível e latente tem o valor de 2305 kWh. Este valor é mais de duas vezes superior ao valor consumo energético anual da operação adaptativa de 1067 kWh. Dessa forma, para o contexto de Belém, a operação adaptativa apresenta uma vantagem significativa comparada com a recuperação de calor sensível e latente.

Para Curitiba, aplicando os melhores resultados na aplicação de recuperação de calor sensível e latente na literatura ao valor de 1473 kWh, obtém um valor de 1252 kWh de consumo energético para climatização em um melhor cenário. Comparando, a aplicação do operação adaptativa apresenta um consumo energético total de climatização de 1004 kWh. Embora a diferença entre os consumos energéticos anuais da recuperação de calor sensível e latente e operação adaptativa seja menor que a verificada para Belém, continua

a operação adaptativa a obter o menor consumo, com sistema com menor complexidade.

Dessa forma, para ambas as cidades, a operação adaptativa apresenta menores consumos energéticos que a recuperação de calor sensível e latente. A magnitude da diferença entre os consumos energéticos dos dois sistemas é maior para Belém que Curitiba, indicando como em condições de calor as vantagens da recuperação de calor sensível e latente na redução de consumo energético de climatização não são tão marcadas quanto em condições de frio.

#### 4.7 QUARTA ETAPA

Na quarta etapa é estimado o balanço energético dos casos com menores e maiores consumos energéticos definidos nas etapas anteriores. O balanço energético, que adota a definição local de energia zero, é a soma algébrica da estimativa de geração fotovoltaica com o consumo energético.

Por definição, esta soma algébrica deve conter um membro positivo e outro negativo. Como os valores de consumo energético das contas de eletricidade apresentam usualmente valores positivos, alguns autores atribuem valor negativo às estimativas de geração fotovoltaica. Dessa forma, um balanço positivo tem um valor negativo. Neste trabalho é feita opção oposta, correspondendo a um balanço positivo de energia um valor positivo. Atribui-se assim às estimativas de geração fotovoltaica um valor positivo e às estimativas de consumo energético um valor negativo.

#### 4.7.1 Geração fotovoltaica em Belém

A Tabela 74 apresenta a estimativa mensal e anual de geração fotovoltaica para Belém.

Tabela 74: Estimativa mensal e anual de geração fotovoltaica para Belém

| Período      | Geração fotovoltaica [kWh] |
|--------------|----------------------------|
| Janeiro      | 1135                       |
| Fevereiro    | 975                        |
| Março        | 1103                       |
| Abril        | 1053                       |
| Maio         | 1289                       |
| Junho        | 1292                       |
| Julho        | 1490                       |
| Agosto       | 1578                       |
| Setembro     | 1420                       |
| Outubro      | 1532                       |
| Novembro     | 1419                       |
| Dezembro     | 1345                       |
| <b>Anual</b> | <b>15631</b>               |

Os meses como maior geração fotovoltaica ocorrem de julho a outubro, o período correspondente ao inverno. No entanto, a localização equatorial de Belém, reduz a influência sazonal na geração fotovoltaica, mais marcada em latitudes mais elevadas. Dessa forma, os padrões de pluviosidade e nebulosidade de Belém maiores no verão, determinam maiores gerações para os meses de inverno.

#### 4.7.2 Comparação entre maior e menor balanço energético para a ventilação natural automática em Belém

O balanço energético anual tem da menor soma anual de graus hora (8 graus hora) tem o valor de 13083 kWh e o balanço energético da maior soma anual tem de graus hora (8206 graus hora) tem um balanço energético de 13082 kWh, apresentando uma diferença desprezível de consumo energético, embora corresponda a uma diferença sensível na soma anual de graus hora. Analisando mensalmente, em todos os meses se verifica um balanço positivo (os balanços mensais estão disponíveis no apêndice C).

A ventilação natural automática mostra uma influência reduzida no balanço energético, dado o baixo consumo energéticos dos motores para operação de brises e das áreas transparentes (áreas de ventilação) que teve um valor anual de 14 kWh para o menor soma anual de graus hora e 15 kWh para a maior soma. Saliente-se que o valor do consumo energético anual não se correlaciona com o valor das somas anuais de graus hora, que são determinadas pelo desempenho térmico do envelope.

#### **4.7.3 Comparação entre maior e menor balanço energético da climatização artificial em Belém**

A climatização artificial automática mostra uma influência significativa no balanço energético. O maior balanço energético tem o valor de 12286 kWh e o menor 4610 kWh. Em ambos os casos, o balanço energético é positivo.

No entanto, a diferença entre os consumos energéticos da climatização artificial, tem um impacto na definição do sistema fotovoltaico. Para o maior balanço energético, o valor do balanço energético, permite o balanço zero com menor capacidade menor, sendo possível atingir o balanço zero com um sistema com metade da geração anual. Para o menor balanço energético, não é possível atingir o balanço zero, caso a geração fosse reduzida a metade. Tal fato excluiria o uso de tecnologias de conversão fotovoltaica de menor eficiência, como filme fino. A extensão do impacto do consumo de climatização artificial, nas condições climáticas de Belém, de envelopes de baixo desempenho térmico afeta o balanço energético anual em milhares de kWh.

#### **4.7.4 Comparação entre os maiores balanços energéticos em Belém**

O maior balanço energético anual para a ventilação natural automática tem um valor 797kWh maior comparado com a climatização artificial. Em ambos os casos, estes valores decorrem da adoção do modelo adaptativo de conforto térmico. No entanto, o baixo consumo energético anual para operação de brises e áreas transparentes de 14 kWh, quase elimina o consumo energético para obtenção de conforto térmico, se complementado com um envelope de alto desempenho térmico.

#### 4.7.5 Geração fotovoltaica em Curitiba

A Tabela 75 apresenta a estimativa mensal e anual de geração fotovoltaica para Curitiba.

Tabela 75: Estimativa mensal e anual de geração fotovoltaica para Curitiba

| Período      | Geração fotovoltaica [kWh] |
|--------------|----------------------------|
| Janeiro      | 1149                       |
| Fevereiro    | 1127                       |
| Março        | 1101                       |
| Abril        | 838                        |
| Mai          | 849                        |
| Junho        | 710                        |
| Julho        | 837                        |
| Agosto       | 949                        |
| Setembro     | 858                        |
| Outubro      | 906                        |
| Novembro     | 1257                       |
| Dezembro     | 1044                       |
| <b>Anual</b> | <b>11623</b>               |

Os meses como maior geração fotovoltaica ocorrem de novembro a março, o período correspondente ao verão. A influência sazonal na geração fotovoltaica, mais é mais marcada para a latitude de Curitiba. Dessa forma, as maiores gerações mensais ocorrem no verão, apesar da maior pluviosidade durante esse período.

#### 4.7.6 Balanço energético para a ventilação natural automática em Curitiba

A ventilação natural automática em Curitiba não foi capaz de garantir condições mínimas de conforto térmico, sendo por isso excluída da análise o balanço energético.

#### **4.7.7 Comparação entre maior e menor balanço energético da climatização artificial em Curitiba**

A climatização artificial automática mostra uma influência significativa no balanço energético. O maior balanço energético tem o valor de 8049 kWh e o menor 4591 kWh. Em ambos os casos, o balanço energético é positivo.

Tal como em Belém, a diferença entre os consumos energéticos da climatização artificial, tem um impacto na definição do sistema fotovoltaico. Para o caso com o maior balanço, é possível atingir o balanço zero com um sistema com metade da geração, seja reduzindo a metade a área de painel ou mantendo a área e substituindo a tecnologia de conversão fotovoltaica utilizada

Para o caso com menor balanço energético, seria possível reduzir parte da área de painel utilizando os módulos monocristalinos. No entanto, balanço zero não seria alcançado com um sistema com metade da área com a mesma eficiência ou utilizando a tecnologia de conversão fotovoltaica de filme fino, mesmo utilizando toda a área de cobertura.

Assim, também para Curitiba, a instalação de um sistema de climatização artificial, mesmo de tecnologia eficiente, em envelopes com baixo desempenho térmico, implicou diferença de consumo energético anual de mais 3400 kWh. Esta diferença tem implicações significativas na definição da capacidade e nas tecnologias de conversão fotovoltaicas possíveis de utilizar.

#### **4.7.8 Comparação entre os maiores balanços energéticos em Curitiba**

Dada a ventilação natural automática não ter atingindo condições de conforto térmico em Curitiba a comparação com a climatização artificial não pode ser feita.



## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 INTRODUÇÃO

As conclusões referem-se à adaptação da Eko House às condições climáticas de Belém e Curitiba. A Eko House foi projetada originalmente para Madri, para participação no *Solar Decathlon Europe*, uma competição internacional de residências unifamiliares. A Eko House foi concebida segundo o paradigma superisolado, para operar 24 horas fechada. O sistema de geração fotovoltaico foi dimensionado para maximizar a produção de energia e não atender somente seu consumo energético.

As adaptações da Eko House variam opções de sombreamento e transmitância térmica segundo dois paradigmas distintos para obtenção de conforto térmico: climatização artificial e ventilação natural automática. A climatização artificial representa o paradigma superisolado. A casa se fecha para o exterior e a climatização opera 24 horas. Este paradigma é testado com temperaturas de controle fixas e temperaturas de controle que ativam a climatização artificial, somente quando as temperaturas ultrapassarem os limites de conforto adaptativo da ASHRAE 55 2010. Os resultados são avaliados através do consumo energético. O sistema de ventilação natural automática apresenta uma filosofia oposta ao superisolamento. A casa se abre para o exterior e o conforto térmico é avaliado através de somas de graus hora de desconforto térmico, segundo o modelo adaptativo da ASHRAE 55 2010.

### 5.2 QUANTIFICAÇÃO E ANÁLISE DAS DIFERENÇAS MÁXIMAS NAS SOMAS DE GRAUS HORA DE DESCONFORTO TÉRMICO E CONSUMOS ENERGÉTICOS

#### 5.2.1 Belém

Em Belém, a ventilação natural automática apresenta uma diferença máxima entre somas anuais de graus hora valor com valor de 8198. A menor soma anual tem o valor 8 graus hora, mostrando condições de conforto térmico durante todo o ano (sombreamento completo, sombreando áreas transparentes e paredes, e nível 2 de transmitância térmica, com valores de 0,14, 0,19 e 0,16 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente). A maior soma anual tem o valor de 8206 graus hora, e não garante condições aceitáveis de conforto térmico, correspondendo a uma média de 22 graus hora de

desconforto por dia (sombreamento nulo, não sombreando áreas transparentes e paredes, e nível 6 de transmitância térmica, com valores de  $1,86\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $3,47\text{ W/m}^2\text{K}$  e  $1,31\text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede e piso, respectivamente).

Para o sistema de climatização artificial, a diferença máxima entre os consumos energéticos anuais tem valor de 7676 kWh. O menor consumo energético anual tem valor 810 kWh (sombreamento completo e o nível 1 de transmitância térmica, com valores de  $0,10\text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $0,13\text{ W/m}^2\text{K}$  e  $0,11\text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede e piso, respectivamente). O maior consumo anual, 8486 kWh (sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica, com valores de  $1,86\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $3,47\text{ W/m}^2\text{K}$  e  $1,31\text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede e piso, respectivamente).

Para a ventilação natural automática, a diferença entre menor e maior valor de soma anual representa a diferença entre conforto térmico e acentuado desconforto térmico. Para a climatização artificial, implica num consumo energético anual quase dez vezes maior. Dessa forma, o impacto em conforto térmico e consumo energético é significativo.

Comparando entre os dois sistemas, os menores valores convergem na opção sombreamento nulo e divergem ligeiramente na transmitância térmica. É possível atingir a menor soma anual de graus hora com o nível 2 de transmitância térmica (com valores de  $0,14$ ,  $0,19$  e  $0,16\text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede e piso, respectivamente) não sendo necessário utilizar o menor nível de transmitância térmica, o nível 1 (com valores de  $0,10\text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $0,13\text{ W/m}^2\text{K}$  e  $0,11\text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede e piso, respectivamente), que garante o melhor desempenho para a climatização artificial.

### 5.2.2 Curitiba

Para a ventilação natural automática, a diferença máxima tem valor de 24369. A menor soma tem valor de 2103, 1514 de frio e 589 de calor (sombreamento nulo e nível 1 de transmitância térmica, com valores de  $0,10\text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $0,13\text{ W/m}^2\text{K}$  e  $0,11\text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede e piso, respectivamente). A maior soma tem valor de 26472, 26401 de frio e 71 de calor (sombreamento completo e o nível 6 de transmitância térmica, com valores de  $1,86\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $3,47\text{ W/m}^2\text{K}$  e  $1,31\text{ W/m}^2\text{K}$  para cobertura, parede e piso, respectivamente). Estes valores não garantem condições de conforto térmico, correspondendo a uma

média de 6 a 73 graus hora de desconforto térmico por dia, respectivamente.

Para o sistema de climatização artificial, a diferença foi de 4755 kWh. O menor consumo anual tem valor de 1039 kWh (sombreamento completo e o nível 1 de transmitância térmica, com valores de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente). O maior consumo anual tem valor de 5794 kWh (sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica, com valores de 1,86W/m<sup>2</sup>K, 3,47 W/m<sup>2</sup>K e 1,31 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente).

Para a ventilação natural automática, a diferença entre menor e maior valor de soma anual aumenta a soma anual de graus hora em mais de dez vezes, alterando de algumas horas de desconforto térmico por dia para desconforto térmico virtualmente em todas as horas do o dia. Para a climatização artificial, implica num consumo energético anual de quase cinco vezes maior.

Comparando entre a ventilação natural automática e climatização artificial, os menores valores divergem na opção sombreamento (nulo e completo, respectivamente) e convergem no nível 1 na transmitância térmica (valores de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente).

### 5.3 ANÁLISE DOS EFEITOS DAS OPÇÕES DE SOMBREAMENTO E DIFERENTES NÍVEIS DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

#### 5.3.1 Influência do sombreamento e transmitância térmica na ventilação natural automática em Belém

Para a ventilação natural automática, a diminuição da temperatura operativa é o fator principal para garantir conforto térmico. Sombreamento e menor transmitância térmica diminuem a temperatura operativa, reduzindo a temperatura superficial das faces internas de superfícies externas. No entanto, menores transmitância térmicas podem impedir perda de calor interno, resultando em sobreaquecimento, ao contrário do sombreamento.

O sombreamento de áreas transparentes (sombreamento parcial) é essencial em Belém, para qualquer transmitância térmica. Comparativamente, tem maior influência para menores transmitância térmicas, pois impede sobreaquecimento. Com sombreamento de áreas transparentes, menores transmitâncias térmicas reduzem somas de graus hora de desconforto térmico. O sombreamento deve

incluir parede, além das áreas transparentes (sombreamento completo), sendo mais importante para altas transmitâncias térmicas, provocando uma redução significativa na soma anual de graus hora. Sombreamento completo e menores transmitâncias térmicas ambas reduzem a amplitude de graus hora.

Estes resultados, são muito dependentes do contexto específico estudado. A infiltração tem uma taxa muito reduzida. O aumento da carga térmica de pessoas, equipamentos e iluminação alteraria os resultados. Com essa condicionante em mente, nota-se que menores transmitâncias térmicas, mostraram reduzir a soma e amplitude de graus hora, desde que as áreas transparentes estejam bem sombreadas com carga interna reduzida.

### **5.3.2 Influência do sombreamento e transmitância térmica na climatização artificial em Belém**

Para Belém, maior sombreamento reduz o consumo energético, dada a intensidade da irradiação solar em Belém. A transmitância térmica em Belém tem um papel duplo: redução de ganhos de calor por condução e redução de ganhos de calor decorrentes da irradiação solar. Dessa forma, menores transmitâncias térmicas resultam em menores consumos energéticos, pois reduzem os dois tipos de ganhos de calor. O sombreamento de áreas transparentes (sombreamento parcial) mostra-se muito eficaz na redução do consumo energético anual. Este fato é válido para todos os níveis de transmitância térmica, particularmente para menores transmitâncias térmicas, por evitar sobreaquecimento. O sombreamento de áreas transparentes, complementado por sombreamento de parede (sombreamento completo), apresenta os menores consumos energéticos. Comparativamente, a redução de consumo energético provocada pelo sombreamento completo é maior para maiores transmitâncias térmicas, sendo uma forma expedita de reduzir significativamente o consumo energético anual em caso de adoção da climatização artificial.

Os resultados mostram que o ganho de calor através de condução do ar exterior para o interior é significativo. Para atingir os menores consumos energéticos, o sombreamento completo não é suficiente, sendo também necessário o uso de reduzida transmitância térmica.

### **5.3.3 Influência do sombreamento e transmitância térmica na ventilação natural automática em Curitiba**

Os resultados para Curitiba mostram uma interação estreita entre sombreamento e transmitância térmica, sendo mais difícil analisar os seus efeitos separadamente em Curitiba que Belém. O sombreamento tem o efeito de reduzir os graus hora de calor e aumentar graus hora de frio. Como os graus hora de frio predominam em Curitiba, a opção sombreamento nulo apresenta menores somas anuais de graus hora de calor e frio. No entanto, esta opção provoca maiores somas anuais de graus hora de calor. A maior carga radiante aumenta a temperatura interna, mas provoca sobreaquecimento quando a temperatura externa é mais elevada. As menores transmitâncias térmicas apresentam, simultaneamente, as menores e maiores somas anuais de graus hora de calor, dependendo da opção de sombreamento. O fato da opção sombreamento nulo apresentar ainda significativas somas anuais de graus hora de calor, mostra que existe um potencial para otimização do sombreamento de áreas transparentes. Dada predominância de graus hora de frio, menores transmitâncias térmicas com opção sombreamento nulo, apresentam as menores somas anuais de graus hora de calor e frio.

Estes resultados são influenciados pela baixa ocupação e cargas internas reduzidas. Maiores cargas internas reduziriam a dependência da irradiação solar para aquecimento nos períodos de frio, mas aumentariam o potencial de sobreaquecimento nos períodos de calor.

### **5.3.4 Influência do sombreamento e transmitância térmica na climatização artificial em Curitiba**

Apesar do frio ser predominante em Curitiba, o desempenho em climatização natural em Curitiba é similar ao de Belém. Maior sombreamento resulta em menores consumos energéticos. Embora a opção sombreamento nulo reduza os graus hora de frio, aumenta o sobreaquecimento interno, resultando num maior o consumo energético total de aquecimento e refrigeração. Dessa forma, a opção sombreamento completo apresenta os menores consumos anuais, seguida do sombreamento parcial, com o sombreamento nulo tendo os maiores consumos energéticos anuais, para transmitâncias térmicas iguais.

Menores transmitâncias térmicas resultam em menores consumos energéticos anuais. A predominância de condições de frio

em Curitiba favorece a conservação de calor. Menores transmitâncias térmicas reduzem as perdas de calor por condução do interior para o exterior, resultando em menores consumos energéticos. No entanto, para que os menores consumos energéticos serem atingidos, a menor transmitância térmica necessita obrigatoriamente de áreas transparentes (sombreamento parcial) e, suplementarmente, de parede (sombreamento completo).

#### 5.4 INTERVALO DE CONTROLE ADAPTATIVO E RECUPERAÇÃO DE CALOR SENSÍVEL E LATENTE EM BELÉM E CURITIBA

Os resultados mostraram uma diferença de 2712 kWh menor que a recuperação de calor sensível e latente em Belém e 3320 kWh em Curitiba. Assumindo que a recuperação de calor sensível e latente apresenta desempenhos similares as melhores práticas na literatura, a diferença de consumo energético anual entre o intervalo de controle adaptativo e a recuperação de calor sensível e latente seria 1495 kWh menor para Belém e 213 kWh menor para Curitiba.

Estes valores questionam a aplicação da recuperação de calor sensível e latente para Belém e Curitiba. O intervalo de controle adaptativo, apresentam menores consumos energéticos e requerem menos equipamento. Adicionalmente, estimula uma maior adaptação e contato com as condições climáticas prevaletentes no meio exterior. Tal atitude permite maior usufruto do meio exterior e implica em menores consumos energéticos cumulativos nas residências e fora delas, ao estimular a tolerância dos usuários a faixas de temperatura mais alargadas.

## 5.5 ESTIMATIVA E COMPARAÇÃO DAS DIFERENÇAS DE CONSUMO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS DE ENERGIA ZERO COM ALTO E BAIXO DESEMPENHO TÉRMICO

Na ventilação natural automática, em Belém, o balanço energético anual (a diferença entre geração e consumos anuais) apresenta o maior valor, 13083 kWh. Este fato decorre do reduzido consumo energético anual dos motores elétricos (14 kWh) que operam as áreas transparentes e os brises. Curitiba é excluída desta análise dado não terem sido garantidas condições de conforto térmico com a ventilação natural automática.

Para a climatização artificial, em Belém, o maior balanço energético anual apresenta o valor de 12030 kWh (com controle adaptativo, opção sombreamento completo e nível 1 de transmitância térmica com valores de 0, 10, 0,13 e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede, e piso, respectivamente). O menor valor de balanço energético tem valor de 4610 kWh (controle temperatura fixa, opção de sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica com valores de 1,86W/m<sup>2</sup>K, 3,47 W/m<sup>2</sup>K e 1,31 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente).

Para Curitiba, o maior balanço energético anual da climatização artificial tem o valor de 8049 kWh (com controle adaptativo, opção sombreamento completo e nível 1 de transmitância térmica com valores de 0, 10, 0,13 e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede, e piso, respectivamente). O menor balanço energético anual tem o valor de 4591 kWh.

Verifica-se que todos os casos atingem o balanço energético zero e ultrapassam resultando em balanços positivos. No entanto, a diferença entre os menores e maiores consumos energéticos é significativa, na ordem dos milhares de kWh ano, decorrentes das diferenças de desempenho térmico dos envelopes. Esta diferença implica em sistemas com maior capacidade. Os resultados mostram a necessidade em medidas de eficiência energética. Especificamente, nas medidas para garantir conforto térmico, que se ignoradas tem aumentam o consumo energético anual de uma residência unifamiliar em milhares de kWh por ano.

## 5.6 LIMITAÇÕES

As temperaturas do intervalo de controle de operação de áreas transparentes mostraram uma elevada sensibilidade na determinação dos graus hora de desconforto térmico. É possível que alterações de poucos graus nas temperaturas de controle reduzam a somas mensais e anuais de graus hora de desconforto térmico para Belém e Curitiba.

O efeito no consumo de diferentes padrões de uso de equipamento e ocupação não é abordado, tendo um efeito significativo nos valores de consumo energético.

O sistema de climatização artificial opera 24 horas em toda a residência, dentro do paradigma de superisolado. No entanto, na realidade residencial brasileira, a operação restrita a alguns cômodos e somente durante alguns períodos do dia pode corresponder melhor com uso efetivo em algumas regiões do Brasil;

A taxa de infiltração de 0,6 ach utilizada é extremamente reduzida para a prática da construção no Brasil;

O consumo do forno elétrico e do fogão de indução é difícil de estimar por falta de dados sobre o tempo de uso médio destes equipamentos e de consumo energético efetivo. A presente tese assumiu 5 minutos de uso diário. No entanto, faltam dados na literatura nacional e internacional do tempo mínimo de uso para confecção de refeições nestes equipamentos. Dada as elevadas potências destes equipamentos, de 3000 a 6000 kW, mesmo tempos reduzidos de uso aumentam significativamente o consumo energético. A potência equivale à adição de dois chuveiros elétricos. Apresenta, dessa forma, o potencial aumentar significativamente o consumo energético residencial brasileiro se adotados em larga escala.

### 5.6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho surgiram algumas questões meritórias de pesquisa em futuros trabalhos:

Pesquisa na complementação da ventilação natural automática com ventiladores de teto e sistemas pessoais de conforto para redução de graus hora de desconforto térmico e garantir taxas mínimas de renovação do ar;

Pesquisa na otimização do controle dos sistemas automáticos de sombreamento;

Melhor compreensão teórica das preferências do usuário perante distintas amplitudes de graus hora de desconforto;

Pesquisa em dados de consumo energético de tecnologias de fonte elétrica para cozinha.



## REFERÊNCIAS

- ACHÃO, C.; SCHAEFFER, R. Decomposition analysis of the variations in residential electricity consumption in Brazil for the 1980-2007 period: Measuring the activity, intensity and structure effects. **Energy Policy**, v. 37, n. 12, p. 5208-5220, 2009. Acesso em: 5/4/2011.
- ALAHMER, A.; MAYYAS, A.; MAYYAS, A. A.; OMAR, M. A.; SHAN, D. Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 6-7, p. 995-1002, 2011. Acesso em: 25/10/2013.
- ALMEIDA, M. A.; SCHAEFFER, R.; LA ROVERE, E. L. The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil. **Energy**, v. 26, n. 4, p. 413-429, 2001. Acesso em: 20/7/2011.
- ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. ,2012. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. .
- ARCHDAILY. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/01-71342/eko-house-a-casa-brasileira-no-solar-decathlon-team-brasil>>. .
- ARENS, E.; ZHANG, H.; HUIZENGA, C. Partial- and whole-body thermal sensation and comfort— Part I: Uniform environmental conditions. **Journal of Thermal Biology**, v. 31, n. 1-2, p. 53-59, 2006. Acesso em: 25/10/2013.
- ASHRAE. ASHRAE Strategic Plan. ,2008. Disponível em: <[http://www.ashraesd.org/20080703\\_ASHRAEStrategicPlan.pdf](http://www.ashraesd.org/20080703_ASHRAEStrategicPlan.pdf)>. .
- ASHRAE 55. ASHRAE Standard 55 Thermal environmental conditions for human occupancy. ,2010. ASHRAE.
- ATHIENITIS, A.; CANDANEDO, J.; O'NEILL, B. Solar Buildings Research Network Demonstration Projects: Towards net zero energy consumption. ,2009. Quebec. Disponível em:

<[http://web.me.com/sevagpogharian/alstonvale/Project\\_-\\_Academic\\_Papers\\_files/Solar%20Buildings%20Research%20Network%20Demonstration%20Projects\\_1.pdf](http://web.me.com/sevagpogharian/alstonvale/Project_-_Academic_Papers_files/Solar%20Buildings%20Research%20Network%20Demonstration%20Projects_1.pdf)>. .

BADESCU, V.; LAASER, N.; CRUTESCU, R. Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania). **Energy**, v. 35, n. 8, p. 3284–3300, 2010. Acesso em: 19/11/2013.

BARDI, U.; EL ASMAR, T.; LAVACCHI, A. Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 53, p. 224–231, 2013. Acesso em: 1/11/2013.

BAYOD-RÚJULA, A. A.; ORTEGO-BIELSA, A.; MARTÍNEZ-GRACIA, A. Photovoltaics on flat roofs: Energy considerations. **Energy**, v. 36, n. 4, p. 1996–2010, 2011. Acesso em: 29/3/2011.

BEIZAEE, A.; LOMAS, K. J.; FIRTH, S. K. National survey of summertime temperatures and overheating risk in English homes. **Building and Environment**, v. 65, p. 1–17, 2013. Acesso em: 2/12/2013.

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, 2013. Acesso em: 18/11/2013.

BERTOLDI, P.; HIRL, B.; LABANCA, N. Energy Efficiency Status Report 2012. ,2012. Disponível em: <<http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/sites/energyefficiency/files/energy-efficiency-status-report-2012.pdf>>. .

BONE, A.; MURRAY, V.; MYERS, I.; DENGEL, A.; CRUMP, D. Will drivers for home energy efficiency harm occupant health? **Perspectives in Public Health**, v. 130, n. 5, p. 233–238, 2010. Acesso em: 26/9/2013.

BRAVO, G.; GONZÁLEZ, E. Thermal comfort in naturally ventilated spaces and under indirect evaporative passive cooling conditions in hot–humid climate. **Energy and Buildings**, v. 63, p. 79–86, 2013. Acesso em: 2/12/2013.

BUILDING & CONSTRUCTION AUTHORITY. Singapore's First Zero Energy Building Launched at the Inaugural Singapore Green Building Week. ,2013. Disponível em:

<[http://www.bca.gov.sg/Newsroom/others/SGBWb\\_ZEB\\_Media\\_release\\_non.pdf](http://www.bca.gov.sg/Newsroom/others/SGBWb_ZEB_Media_release_non.pdf)>. .

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. Local Ordinances Exceeding the 2008 Building Energy Efficiency Standards. Disponível em:

<<http://www.energy.ca.gov/title24/2008standards/ordinances/>>. Acesso em: 20/1/2012.

CALIFORNIA LEGISLATURE. **ASSEMBLY BILL No. 212**. 2009.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R. J.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 222–229, 2010. Acesso em: 30/3/2011.

CÂNDIDO, C.; DEDEAR, R.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Cooling exposure in hot humid climates: Are occupants “addicted”? **Architectural Science Review**, v. 53, n. 1, p. 59–64, 2010. Acesso em: 30/3/2011.

CARLISLE, N.; ELLING, J.; PENNEY, T. Renewable Energy Community: Key Elements. ,2007. National Renewable Energy Laboratory.

Disponível em:

<[www.nrel.gov/vehiclesandfuels/hev/pdfs/42774.pdf](http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/hev/pdfs/42774.pdf)>. .

CEPHEUS. Cost Efficient Passive Houses as European Standards.

Disponível em: <<http://www.cepheus.de/eng/>>. Acesso em: 12/1/2009.

CERVANTES, C.; JANNUZZI, G. DE M. Net metering: Incentivando novas tecnologias e auto-suficiência energética. p.1976–1981, 2002. Rio de Janeiro.

CHARRON, R. A REVIEW OF LOW AND NET-ZERO ENERGY SOLAR HOME INITIATIVES. ,2005. Natural Resources Canada. Disponível em:

<[http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-ncan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2005-133/2005-133\\_e.pdf](http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-ncan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2005-133/2005-133_e.pdf)>. .

CHARRON, R.; ATHIENITIS, A. Design and Optimization of Net Zero Energy Solar Homes. **ASHRAE Transactions**, v. 112, n. 2, p. 285–295, 2006.

CHEN, C. Y.; MISTRY, J.; FUNG, A. S.; LEONG, W. H.; JHINGAN, S. Design and Analysis of an Integrated Heat and Energy Recovery Ventilation System with Economizer Control for Net-Zero Energy Solar Houses. **ASHRAE Transactions**, v. 118, n. 2, p. 82–89, 2012. Acesso em: 19/9/2013.

CHENG, Y.; NIU, J.; GAO, N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. **Building and Environment**, v. 47, p. 13–22, 2012. Acesso em: 25/10/2013.

CLOSSON, S. The military and energy: Moving the United States beyond oil. **Energy Policy**, v. 61, p. 306–316, 2013. Acesso em: 26/8/2013.

CORDELL, D.; DRANGERT, J.-O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009. Acesso em: 9/4/2011.

CRAWLEY, D. Building America: Research Projects. Disponível em: <[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/building\\_america/cfm/project\\_locations.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/building_america/cfm/project_locations.cfm)>. Acesso em: 22/3/2011.

CRAWLEY, D. Better Buildings by Design. ,2010. Disponível em: <[http://www.encyvermont.com/docs/for\\_partners/bbd\\_presentations/2010/BBD10\\_Crawley\\_NetZeroEnergy.pdf](http://www.encyvermont.com/docs/for_partners/bbd_presentations/2010/BBD10_Crawley_NetZeroEnergy.pdf)>. .

CRAWLEY, D. Getting from AEDGs to Zero-Energy Buildings. ,2011. Cedar Valley.

DALE, M.; KRUMDIECK, S.; BODGER, P. Net energy yield from production of conventional oil. **Energy Policy**, v. 39, n. 11, p. 7095–7102, 2011. Acesso em: 4/11/2013.

DÁVI, G. Avaliação do comportamento energético de um edifício residencial à energia neto positiva com sistema solar fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) [dissertação]. Florianópolis: UFSC; 2013.

DEAR, R. DE; BRAGER, G.; COOPER, D. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference FINAL REPORT ASHRAE RP- 884. ,1997.

DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, n. 1a, p. 145–167, 1998.

DE DEAR, R. J. Adaptive thermal comfort in building management and performance. Proceedings of the eighth international conference for healthy buildings 2006: creating a healthy indoor environment for people,. **Anais...** , 2006. Lisbon.

DE DEAR, R. J.; AKIMOTO, T.; ARENS, E. A.; et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. **Indoor Air**, v. 23, n. 6, p. 442–461, 2013. Acesso em: 3/12/2013.

DELFANI, S.; PASDARSHAHRI, H.; KARAMI, M. Experimental investigation of heat recovery system for building air conditioning in hot and humid areas. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 62–68, 2012. Acesso em: 18/9/2013.

DENG, S.; DALIBARD, A.; MARTIN, M.; et al. Energy supply concepts for zero energy residential buildings in humid and dry climate. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 6, p. 2455–2460, 2011. Acesso em: 29/3/2011.

DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT. Code for Sustainable Homes: A step-change in sustainable home building practice - Planning, building and the environment - Department for Communities and Local Government. Disponível em: <<http://www.communities.gov.uk/archived/publications/planningandbuilding/codesustainable>>. Acesso em: 29/4/2011.

DIMITROULOPOULOU, C. Ventilation in European dwellings: A review. **Building and Environment**, v. 47, p. 109–125, 2012. Acesso em: 3/10/2013.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings.

**Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1566–1572, 2011. Acesso em: 15/10/2013.

ECODESIGN PREPARATORY STUDY ENTR LOT 6. Ventilation Systems, ENTR Lot 6. ,2012. Disponível em: <<http://www.ecohvac.eu/downloads/Exec%20Summary%20Lot%206%20Ventilation%20Final%20Report.pdf>>. .

EICKER, U.; DALIBARD, A. Photovoltaic–thermal collectors for night radiative cooling of buildings. **Solar Energy**, v. 85, n. 7, p. 1322–1335, 2011. Acesso em: 29/11/2012.

EKOHOUSE. Ekó House. Disponível em: <<http://ekobrasil.org/>>. Acesso em: 7/11/2013.

EL FOUIH, Y.; STABAT, P.; RIVIÈRE, P.; HOANG, P.; ARCHAMBAULT, V. Adequacy of air-to-air heat recovery ventilation system applied in low energy buildings. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 29–39, 2012. Acesso em: 18/9/2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. ,2013. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2013\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf)>. .

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2013. ,2013. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf)>. .

EN 15251. CEN. ,2007. CEN, Brussels.

ENERCITY. CEPHEUS: Final Technical Report. ,2001. Disponível em: <[http://www.passivehouse.com/07\\_eng/news/CEPHEUS\\_final\\_long.pdf](http://www.passivehouse.com/07_eng/news/CEPHEUS_final_long.pdf)>. .

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Disponível em: <<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=97&t=3>>. .

ESBENSEN, T. V.; KORSGAARD, V. Dimensioning of the solar heating system in the zero energy house in Denmark. **Solar Energy**, v. 19, n. 2, p. 195–199, 1977. Acesso em: 5/4/2011.

EUROPEAN COUNCIL FOR AN ENERGY EFFICIENT ECONOMY. Steering through the maze #2 Nearly zero energy buildings: achieving the EU 2020 target. ,2011. Disponível em:  
<<http://www.eceee.org/buildings/Steering-2-zeroBLDgs.pdf>>. .

EUROPEAN PARLIAMENT. All new buildings to be zero energy from 2019 say MEPs. Disponível em:  
<<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=en&type=IM-PRESS&reference=20090422IPR54163>>. Acesso em: 22/3/2011.

EUROPEAN PARLIAMENT. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. 2010.

FANTAZZINI, D.; HÖÖK, M.; ANGELANTONI, A. Global oil risks in the early 21st century. **Energy Policy**, v. 39, n. 12, p. 7865–7873, 2011. Acesso em: 13/11/2013.

FEIST, W. Passive House Definition Independent of Climate. Disponível em:  
<[http://www.passivhaustagung.de/Passive\\_House\\_E/passivehouse\\_definition.html](http://www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/passivehouse_definition.html)>. Acesso em: 24/10/2011a.

FEIST, W. 15 years Passive House in Darmstadt - Kranichstein. Disponível em:  
<[http://www.passivhaustagung.de/Kran/First\\_Passive\\_House\\_Kranichstein\\_en.html](http://www.passivhaustagung.de/Kran/First_Passive_House_Kranichstein_en.html)>. Acesso em: 4/4/2011b.

FEIST, W. What Can be a Passive House in Your Region with your Climate? Disponível em:  
<[http://www.passiv.de/07\\_eng/FirstSteps/First\\_F.htm](http://www.passiv.de/07_eng/FirstSteps/First_F.htm)>. Acesso em: 6/4/2011.

FEIST, W.; SCHNIEDERS, J.; DORER, V.; HAAS, A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive

House concept. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 11, p. 1186–1203, 2005. Acesso em: 6/4/2011.

FERRANTE, A.; CASCELLA, M. T. Zero energy balance and zero on-site CO<sub>2</sub> emission housing development in the Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 8, p. 2002–2010, 2011. Acesso em: 30/1/2012.

FONG, K. F.; LEE, C. K. Towards net zero energy design for low-rise residential buildings in subtropical Hong Kong. **Applied Energy**, v. 93, n. 0, p. 686–694, 2012. Acesso em: 29/11/2012.

FOSTER, R. JAPAN PHOTOVOLTAICS MARKET OVERVIEW. ,2005. Sandia National Laboratories. Disponível em: <<http://solar.nmsu.edu/publications/Japan%20Report.pdf>>. .

FRANCO, M.; BAIRD, G.; GARDE, F.; LENOIR, A. Environmental design and performance of the ENERPOS building, Reunion island, France. ,2011. Disponível em: <<http://task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DC-TP12-Garde-2011-06.pdf>>. .

GARDE, F.; BASTIDE, A.; WURTZ, E.; et al. ENERPOS: A FRENCH RESEARCH PROGRAM FOR DEVELOPING NEW METHODS FOR THE DESIGN OF ZERO ENERGY BUILDINGS IN HOT CLIMATES. ,2007. Praga. Disponível em: <[http://www.cesb.cz/cesb07\\_proceedings/070\\_Garde.pdf](http://www.cesb.cz/cesb07_proceedings/070_Garde.pdf)>. .

GARDE, F.; LENOIR, A.; THELLIER, F. Towards net zero energy buildings in hot climate, part 2: experimental feedback. **ASHRAE Transactions**, v. 117, n. 1, p. 458+, 2011. Acesso em: 29/4/2014.

GARDE, F.; OTTENWELTER, E.; BORNAREL, A. Integrated Building Design in Tropical Climates: Lessons Learned from the ENERPOS Net Zero Energy Building. **ASHRAE Transactions**, v. 118, n. 1, p. 81–89, 2012. Acesso em: 28/4/2014.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4107–4120, 2007. Acesso em: 14/6/2011.

GILL, Z. M.; TIERNEY, M. J.; PEGG, I. M.; ALLAN, N. Low-energy dwellings: the contribution of behaviours to actual performance. **Building Research & Information**, v. 38, n. 5, p. 491–508, 2010. Acesso em: 26/9/2013.

GOLDSTEIN, D. B.; BURT, L.; HORNER, J.; ZIGELBAUM, N. Zeroing in on Net-Zero Buildings: Can We Get There? How Will We Know When We Have Arrived? **ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, 2010.

GRIFFITH, B.; TORCELLINI, P.; LONG, N.; CRAWLEY, D.; RYAN, J. Assessment of the Technical Potential for Achieving Zero-Energy Commercial Buildings. ,2006. Disponível em: <[http://simulationresearch.lbl.gov/dirpubs/06ACEEE/06aceee\\_90.pdf](http://simulationresearch.lbl.gov/dirpubs/06ACEEE/06aceee_90.pdf)>. Acesso em: 12/4/2011.

GROT, R. A.; HARRJE, D. T.; JOHNSTON, L. C. APPLICATION OF THERMOGRAPHY FOR EVALUATING EFFECTIVENESS OF RETROFIT MEASURES. Proc of the Bienn Infrared Inf Exch. **Anais...** , 1976. St Louis, MO, USA: AGA Corp, Secaucus, NJ.

GUPTA, R.; GREGG, M. Preventing the overheating of English suburban homes in a warming climate. **Building Research & Information**, v. 41, n. 3, p. 281–300, 2013. Acesso em: 3/12/2013.

HAMADA, Y.; NAKAMURA, M.; OCHIFUJI, K.; YOKOYAMA, S.; NAGANO, K. Development of a database of low energy homes around the world and analyses of their trends. **Renewable Energy**, v. 28, n. 2, p. 321–328, 2003. Acesso em: 15/9/2011.

HEDGES, K. E.; DENZER, A. S.; YAVUZTURK, C. The solar decathlon: Lessons learned from transportable solar houses. Proceedings of the 4th International Structural Engineering and Construction Conference, ISEC-4 - Innovations in Structural Engineering and Construction. **Anais...** v. 2, p.1291–1296, 2008. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-55549104414&partnerID=40&md5=d14844b896db81069d9465d85021af13>>. Acesso em: 6/4/2011.

HENRIQUES, S. T.; KANDER, A. The modest environmental relief resulting from the transition to a service economy. **Ecological Economics**, v. 70, n. 2, p. 271–282, 2010. Acesso em: 15/6/2011.

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, 2010. Acesso em: 27/3/2011.

HILL, D. Field Survey of Heat Recovery Ventilation. ,1998. Disponível em: <[http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2011/schl-cmhc/nh18-1/NH18-1-90-1998-eng.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2011/schl-cmhc/nh18-1/NH18-1-90-1998-eng.pdf)>. .

HIMPE, E.; TRAPPERS, L.; DEBACKER, W.; et al. Life cycle energy analysis of a zero-energy house. **Building Research & Information**, v. 41, n. 4, p. 435–449, 2013. Acesso em: 18/9/2013.

HOLLADAY, M. THE HISTORY OF SUPERINSULATED HOUSES IN NORTH AMERICA. , 22. set. 2010. pdf, Vancouver, British Columbia. Disponível em: <<http://homepage.mac.com/aleaman2/UBToverflow/HolladaySuperinsulationHistory22Sep10.pdf>>. .

HOQUE, S. Net zero energy homes: An evaluation of two homes in the northeastern United States. **Journal of Green Building**, v. 5, n. 2, p. 79–90, 2010. Acesso em: 11/5/2011.

HORRIGAN, L.; LAWRENCE, R. S.; WALKER, P. How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. **Environmental Health Perspectives**, v. 110, n. 5, p. 445–456, 2002.

HUGHES, L.; RUDOLPH, J. Future world oil production: growth, plateau, or peak? **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 3, n. 4, p. 225–234, 2011. Acesso em: 26/10/2011.

INMETRO. Catálogo Selo Procel 2011. ,2011a. INMETRO. Disponível em: <[http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={2DEB4057-D085-49A8-A66E-5D946249DC56}](http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={2DEB4057-D085-49A8-A66E-5D946249DC56}>)>. .

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia - Programa Brasileiro de Etiquetagem - Tabela de Consumo de Energia Elétrica - Chuveiros Elétricos. ,2011b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. ,2011. United Nations. Disponível em: <[http://www.unep.org/pdf/SRREN\\_FD\\_SPM\\_approved\\_plenary\\_v\\_03\\_final.pdf](http://www.unep.org/pdf/SRREN_FD_SPM_approved_plenary_v_03_final.pdf)>. .

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Outlook 2013. ,2013. Disponível em: <[http://www.eceee.org/all-news/news/news\\_2013/world-energy-outlook-2013/executive-summary](http://www.eceee.org/all-news/news/news_2013/world-energy-outlook-2013/executive-summary)>. .

INVIDIATA, A. **Eko House Avaliação e Mudanças Projetuais no Cenário Brasileiro**, 2013. Mestrado, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

INVIDIATA, A.; ORDENES, M. Ekó House : Behaviour Evaluation In Different Brazilian Climatic Conditions. Passive and Low Energy Architecture. **Anais...** , 2012. Lima: PLEA 2012. Disponível em: <<http://www.plea2012.pe/pdfs/T11-20120123-0016.pdf>>. .

INVIDIATA, A.; ORDENES, M. Design changes for energy efficiency of solar decathlon house in Brazil: a case study Ekò House. **Journal of Building Performance Simulation**, 2013.

IQBAL, M. T. A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland. **Renewable Energy**, v. 29, n. 2, p. 277-289, 2004. Acesso em: 12/5/2011.

ISAMU, O. Zero Energy House. **Refrigeration**, v. 75, n. 869, p. 200-204, 2000. Acesso em: 6/4/2011.

JANNUZZI, G. D. M.; SCHIPPER, L. The structure of electricity demand in the Brazilian household sector. **Energy Policy**, v. 19, n. 9, p. 879-891, 1991. Acesso em: 20/7/2011.

JANNUZZI, G.; GOMES, R.; VARELA, F. Sistemas Individuais de Geração de Energia: a geração FV e atual legislação no Brasil. , Maio. 2010.

Oficina, Asunción. Disponível em:

<[http://www.olade.org/electricidad/Documents/ponencias/Dia%207%20de%20mayo/Sesion%204/Jannuzzi\\_Generacion%20FV%20y%20legislacion%20actual%20en%20Brasil.pdf](http://www.olade.org/electricidad/Documents/ponencias/Dia%207%20de%20mayo/Sesion%204/Jannuzzi_Generacion%20FV%20y%20legislacion%20actual%20en%20Brasil.pdf)>. .

JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A.; BAETENS, R. The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. **Journal of Building Physics**, 2010. Disponível em: <<http://jen.sagepub.com/content/early/2010/07/15/1744259110372782.abstract>>. Acesso em: 20/7/2011.

JENDRITZKY, G.; DEAR, R. DE; HAVENITH, G. UTCI—Why another thermal index? **International Journal of Biometeorology**, v. 56, n. 3, p. 421–428, 2012. Acesso em: 25/10/2013.

JWO, C. S.; CHEN, T. Y.; HSU, C. F.; CHIEN, L. Y.; TSAI, M. Y. Energy Saving Analysis on Application of Condensing Heat Recovery to Constant Temperature/Humidity System. **Applied Mechanics and Materials**, v. 291-294, p. 1805–1811, 2013. Acesso em: 2/10/2013.

KAYNAKLI, O.; KILIC, M. Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions. **Building and Environment**, v. 40, n. 2, p. 165–174, 2005. Acesso em: 25/10/2013.

KIM, S.-M.; LEE, J.-H.; KIM, S.; MOON, H. J.; CHO, J. Determining operation schedules of heat recovery ventilators for optimum energy savings in high-rise residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 46, p. 3–13, 2012. Acesso em: 24/9/2013.

KISACIKOGLU, M. C.; OZPINECI, B.; TOLBERT, L. M. Effects of V2G reactive power compensation on the component selection in an EV or PHEV bidirectional charger. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings. **Anais...** p.870–876, 2010. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-78650158636&partnerID=40&md5=25bd10cfb910fb43a0fe4f8218a4e093>>. Acesso em: 11/4/2011.

KOLOKOTSA, D.; ROVAS, D.; KOSMATOPOULOS, E.; KALAITZAKIS, K. A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings.

,2011. Disponível em:

<<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77957201100&partnerID=40&md5=bf9cf06d51f868eb9c925c4c14c9677>>. Acesso em: 11/5/2011.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. (ORGS.). **Casa Eficiente Consumo e Geração de Energia**. Florianópolis, 2010.

LAUSTSEN, J. Definition of Zero Energy Buildings. ,2009. Workshop, Washington. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/31739775/Definitions-Zero-Energy-Buildings>>. .

LAUSTSEN, J. SBN Conference, New Initiatives Introduction of the workshop. ,2011. Workshop, Paris. Disponível em: <[http://www.iea.org/work/2011/sbn/SBN01\\_Laustsen\\_opening.pdf](http://www.iea.org/work/2011/sbn/SBN01_Laustsen_opening.pdf)> ..

LAVERGE, J.; JANSSENS, A. Heat recovery ventilation operation traded off against natural and simple exhaust ventilation in Europe by primary energy factor, carbon dioxide emission, household consumer price and exergy. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 315–323, 2012. Acesso em: 30/9/2013.

LAVERGE, J.; JANSSENS, A. Optimization of design flow rates and component sizing for residential ventilation. **Building and Environment**, v. 65, p. 81–89, 2013. Acesso em: 18/9/2013.

LECKNER, M.; ZMEUREANU, R. Life cycle cost and energy analysis of a Net Zero Energy House with solar combisystem. **Applied Energy**, v. 88, n. 1, p. 232–241, 2011. Acesso em: 29/3/2011.

LEE, J. W.; JANG, E. Y.; LEE, S. H.; et al. Influence of the spectral solar radiation on the air flow and temperature distributions in a passenger compartment. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 75, p. 36–44, 2014. Acesso em: 25/10/2013.

LEGER, E. Superinsulated Homes. **Environmental Science & Technology**, v. 22, n. 12, p. 1399–1400, 1988. Acesso em: 23/9/2011.

LEGGETT, L. M. W.; BALL, D. A. The implication for climate change and peak fossil fuel of the continuation of the current trend in wind and solar energy production. **Energy Policy**, v. 41, n. 0, p. 610–617, 2012. Acesso em: 18/1/2012.

LENOIR, A.; THELLIER, F.; GARDE, F. Towards Net Zero Energy Buildings in Hot Climate, Part 2: Experimental Feedback. ,2011. Disponível em: <<http://task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DC-TP7-Garde-2011-11.pdf>>. .

LIMA, B. W. F. **Geração distribuída aplicada à edificações : edifícios de energia zero e o caso do laboratório de ensino da FEC-Unicamp**, 31. ago. 2012. Dissertação de Mestrado, Campinas: Unicamp. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000879521>>. Acesso em: 17/5/2013.

LIPING, P.; YINGJIE, W.; MENG, L.; HELIN, Z.; JUN, W. Method to predicting optimal cabin operative temperature for civil aircraft. **Building and Environment**, v. 69, p. 160–170, 2013. Acesso em: 25/10/2013.

LIU, J.; LI, W.; LIU, J.; WANG, B. Efficiency of energy recovery ventilator with various weathers and its energy saving performance in a residential apartment. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 1, p. 43–49, 2010. Acesso em: 18/9/2013.

LIU, S. **A Novel Heat Recovery/Desiccant Cooling System**, 2008. Nottingham: University of Nottingham. Disponível em: <[http://etheses.nottingham.ac.uk/1602/1/A\\_Novel\\_Heat\\_Recovery\\_and\\_Dessicant\\_Cooling\\_System.pdf](http://etheses.nottingham.ac.uk/1602/1/A_Novel_Heat_Recovery_and_Dessicant_Cooling_System.pdf)>. .

LOMAS, K. J.; GIRIDHARAN, R. Thermal comfort standards, measured internal temperatures and thermal resilience to climate change of free-running buildings: A case-study of hospital wards. **Building and Environment**, v. 55, p. 57–72, 2012. Acesso em: 2/12/2013.

LOWE, R.; JOHNSTON, D. A FIELD TRIAL OF MECHANICAL VENTILATION WITH HEAT RECOVERY IN LOCAL AUTHORITY, LOW-

RISE HOUSING. ,1997. Disponível em:

<<http://www.leedsmet.ac.uk/as/cebe/projects/derwentside.pdf>>. .

LUND, H.; KEMPTON, W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. **Energy Policy**, v. 36, n. 9, p. 3578–3587, 2008. Acesso em: 5/4/2011.

MA, Q.; WANG, R. Z.; DAI, Y. J.; ZHAI, X. Q. Performance analysis on a hybrid air-conditioning system of a green building. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, p. 447–453, 2006. Acesso em: 15/10/2013.

MANZ, H.; HUBER, H.; HELFENFINGER, D. Impact of air leakages and short circuits in ventilation units with heat recovery on ventilation efficiency and energy requirements for heating. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 2, p. 133–139, 2001. Acesso em: 30/9/2013.

MANZ, H.; HUBER, H.; SCHÄLIN, A.; et al. Performance of single room ventilation units with recuperative or regenerative heat recovery. **Energy and Buildings**, v. 31, n. 1, p. 37–47, 2000. Acesso em: 3/10/2013.

MARDIANA, A.; RIFFAT, S. B. Review on physical and performance parameters of heat recovery systems for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 174–190, 2013. Acesso em: 18/9/2013.

MARDIANA-IDAYU, A.; RIFFAT, S. B. Review on heat recovery technologies for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 2, p. 1241–1255, 2012. Acesso em: 18/9/2013.

MARSZAL, A. J.; HEISELBERG, P.; BOURRELLE, J. S.; et al. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011. Acesso em: 6/4/2011.

MASON, I. G.; PAGE, S. C.; WILLIAMSON, A. G. Security of supply, energy spillage control and peaking options within a 100% renewable electricity system for New Zealand. **Energy Policy**, v. 60, p. 324–333, 2013. Acesso em: 19/5/2014.

MAYER, H.; HÖPPE, P. Thermal comfort of man in different urban environments. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 38, n. 1, p. 43–49, 1987. Acesso em: 25/10/2013.

MCLEOD, R. S.; HOPFE, C. J.; KWAN, A. An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings. **Building and Environment**, v. 70, p. 189–209, 2013. Acesso em: 19/11/2013.

MCLEOD, R. S.; HOPFE, C. J.; REZGUI, Y. An investigation into recent proposals for a revised definition of zero carbon homes in the UK. **Energy Policy**, v. 46, n. 0, p. 25–35, 2012. Acesso em: 29/11/2012.

MEIER, A. The bumpy road to net-zero energy — eceee. Disponível em: <[http://www.eceee.org/eceeeorg/columnists/Alan\\_Meier/the-bumpy-road-to-net-zero-energy](http://www.eceee.org/eceeeorg/columnists/Alan_Meier/the-bumpy-road-to-net-zero-energy)>. Acesso em: 1/11/2011.

MILLER, W.; BUYS, L. Post-occupancy Analysis of a Zero Energy Home (ZEH). Disponível em: <<http://eprints.qut.edu.au/38552/>>. Acesso em: 11/5/2011.

MILLER, W.; BUYS, L. Anatomy of a sub-tropical Positive Energy Home (PEH). **Solar Energy**, v. 86, n. 1, p. 231–241, 2012. Acesso em: 29/11/2012.

MIN, J.; SU, M. Performance analysis of a membrane-based energy recovery ventilator: Effects of membrane spacing and thickness on the ventilator performance. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 8–9, p. 991–997, 2010. Acesso em: 24/9/2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>>. Acesso em: 14/6/2011.

MLAKAR, J.; ŠTRANCAR, J. Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 6, p. 1443–1451, 2011. Acesso em: 1/10/2013.

MLECNIK, E. Defining nearly zero-energy housing in Belgium and the Netherlands. **Energy Efficiency**, 2011. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/x4066655x3876865/>>. Acesso em: 4/11/2011.

MLECNIK, E.; SCHÜTZE, T.; JANSEN, S. J. T.; et al. End-user experiences in nearly zero-energy houses. **Energy and Buildings**, v. 49, n. 0, p. 471–478, 2012. Acesso em: 29/11/2012.

MOHAMED, A.; HASAN, A.; SIRÉN, K. Fulfillment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives. **Applied Energy**, v. 114, p. 385–399, 2014. Acesso em: 18/11/2013.

MOLIN, A.; ROHDIN, P.; MOSHFEGH, B. Investigation of energy performance of newly built low-energy buildings in Sweden. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2822–2831, 2011. Acesso em: 9/10/2013.

MOLINA, D.; LU, C.; SHERMAN, V.; HARLEY, R. G. Model Predictive and Genetic Algorithm-Based Optimization of Residential Temperature Control in the Presence of Time-Varying Electricity Prices. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 3, p. 1137–1145, 2013.

MONTENEGRO, A. DE A. **AVALIAÇÃO DO RETORNO DO INVESTIMENTO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS A RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES URBANAS NO BRASIL**, 2013. Master, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://www.dropbox.com/s/el2ao8tpazd8bx8/Montenegro2013.pdf>>. .

NATURAL RESOURCES CANADA. Heat Recovery Ventilators. ,2012. Disponível em: <[http://oee.nrcan.gc.ca/sites/oee.nrcan.gc.ca/files/files/pdf/publications/HRV\\_EN.pdf](http://oee.nrcan.gc.ca/sites/oee.nrcan.gc.ca/files/files/pdf/publications/HRV_EN.pdf)>. .

NEWELL, T.; NEWELL, B. Modeling zero energy. **ASHRAE Journal**, v. 52, n. 10, p. 65–68, 2010.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. **Building and Environment**, International Symposium on the Interaction between Human and Building Environment Special Issue Section., v. 45, n. 1, p. 11–17, 2010. Acesso em: 24/4/2014.

NIK, V. M.; KALAGASIDIS, A. S. 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, 2013. Acesso em: 3/12/2013.

NORTON, P.; CHRISTENSEN, C. Performance Results from a Cold Climate Case Study for Affordable Zero Energy Homes. **ASHRAE Transactions**, v. 114, n. 1, p. 218–229, 2008.

NORTON, P.; CHRISTENSEN, C.; HANCOCK, E.; BARKER, G.; REEVES, P. **The NREL/Habitat for Humanity Zero Energy Home: A Cold Climate Case Study for Affordable Zero Energy Homes**. National Renewable Energy Laboratory, 2008.

OP'T VELD, P.; PASSLACK-ZWAANS, C. IEA annex 27: Evaluation and demonstration of domestic ventilation systems. Assessments on noise. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 3, p. 263–273, 1998. Acesso em: 9/10/2013.

PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Edifícios de energia zero: definições, políticas, exemplos. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO., **Anais...** v. 12, p.10, 2008. Fortaleza: ANTAC.

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, 2013. Acesso em: 7/11/2013.

PARK, J. S.; KIM, H. J. A field study of occupant behavior and energy consumption in apartments with mechanical ventilation. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 19–25, 2012. Acesso em: 9/10/2013.

PARKER, D. Very low energy homes in the United States: Perspectives on performance from measured data. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 5, p. 512–520, 2009. Acesso em: 19/9/2011.

PASSIPEDIA. Passive Houses in tropical climates - passipedia.org. Disponível em: <[http://passipedia.passiv.de/passipedia\\_en/basics/passive\\_houses\\_in\\_different\\_climates/passive\\_house\\_in\\_tropical\\_climates](http://passipedia.passiv.de/passipedia_en/basics/passive_houses_in_different_climates/passive_house_in_tropical_climates)>. Acesso em: 19/9/2013.

PASSIVE ON. Technical Guide Lines for Passive House. Disponível em: <<http://www.passive-on.org/CD/1.%20Technical%20Guidelines/Part%202/Passivhaus%20UK/Part%202%20-%20UK%20Passivhaus%20in%20Detail.pdf>>. Acesso em: 6/4/2011a.

PASSIVE ON. Passive House or Passivhaus\_. Disponível em: <about:blank>. Acesso em: 5/4/2011b.

PASUT, W.; ZHANG, H.; ARENS, E.; KAAM, S.; ZHAI, Y. Effect of a heated and cooled office chair on thermal comfort. **HVAC and R Research**, v. 19, n. 5, p. 574–583, 2013.

PINEAU, D.; RIVIÈRE, P.; STABAT, P.; HOANG, P.; ARCHAMBAULT, V. Performance analysis of heating systems for low energy houses. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 45–54, 2013. Acesso em: 30/9/2013.

VAN DER PLUIJM, J. **THE ROBUSTNESS AND EFFECTIVENESS OF MECHANICAL VENTILATION IN AIRTIGHT DWELLINGS**, 2012. Disponível em: <[http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/master/Pluijm\\_2010.pdf](http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/master/Pluijm_2010.pdf)>. .

POGHARIAN, S. GETTING TO NET ZERO ENERGY FOOD: the Alstonvale Net Zero House. ,2008. Disponível em: <[http://web.me.com/sevagpogharian/alstonvale/Lifestyle\\_-\\_Net\\_Zero\\_Food\\_files/Net%20Zero%20Energy%20Food.pdf](http://web.me.com/sevagpogharian/alstonvale/Lifestyle_-_Net_Zero_Food_files/Net%20Zero%20Energy%20Food.pdf)>. .

PRAENE, J. P.; DAVID, M.; SINAMA, F.; MORAU, D.; MARC, O. Renewable energy: Progressing towards a net zero energy island, the

case of Reunion Island. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 426–442, 2012. Acesso em: 29/11/2012.

PROCEL. PESQUISA DE EQUIPAMENTOS E HÁBITOS DE USO ANO BASE 2005. ,2007.

RASOULI, M.; GE, G.; SIMONSON, C. J.; BESANT, R. W. Uncertainties in energy and economic performance of HVAC systems and energy recovery ventilators due to uncertainties in building and HVAC parameters. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, n. 1, p. 732–742, 2013. Acesso em: 18/9/2013.

RASOULI, M.; SIMONSON, C. J.; BESANT, R. W. Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1376–1385, 2010. Acesso em: 18/9/2013.

RAUGEI, M.; FULLANA-I-PALMER, P.; FTHENAKIS, V. The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles. **Energy Policy**, v. 45, p. 576–582, 2012. Acesso em: 1/11/2013.

RIDLEY, I.; CLARKE, A.; BERE, J.; et al. The monitored performance of the first new London dwelling certified to the Passive House standard. **Energy and Buildings**, v. 63, p. 67–78, 2013. Acesso em: 25/9/2013.

ROBERSON, J. A.; BROWN, R. E.; KOOMEY, J. G.; GREENBERG, S. E. RECOMMENDED VENTILATION STRATEGIES FOR ENERGY-EFFICIENT PRODUCTION HOMES. ,1998. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Disponível em: <<http://enduse.lbl.gov/Info/LBNL-40378.pdf>>. .

RODRIGUEZ-UBINAS, E.; RUIZ-VALERO, L.; VEGA, S.; NEILA, J. Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 49–62, 2012. Acesso em: 7/11/2013.

ROTAR, N.; BADESCU, V. Considerations on the Implementation of the Passive House Concept in South-Eastern Europe (Romania).

**International Journal of Green Energy**, v. 8, n. 7, p. 780–794, 2011. Acesso em: 1/10/2013.

ROULET, C.-A.; HEIDT, F. ; FORADINI, F.; PIBIRI, M.-C. Real heat recovery with air handling units. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 5, p. 495–502, 2001. Acesso em: 30/9/2013.

RÜTHER, R.; REGUSE, W.; DACOREGIO, M.; et al. GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAICS IN BRAZIL. Proceedings of the Rio 5 Conference. **Anais...** v. 1, p.177–179, 2005. Rio de Janeiro: Rio Solar. Disponível em: <[http://www.lepten.ufsc.br/publicacoes/solar/eventos/2005/ISES/ruther\\_reguse.pdf](http://www.lepten.ufsc.br/publicacoes/solar/eventos/2005/ISES/ruther_reguse.pdf)>. .

RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1027–1030, 2011. Acesso em: 19/2/2012.

SANTOS, H. R. R.; LEAL, V. M. S. Energy vs. ventilation rate in buildings: A comprehensive scenario-based assessment in the European context. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 111–121, 2012. Acesso em: 30/9/2013.

SARTORI, I.; NAPOLITANO, A.; VOSS, K. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. **Energy and Buildings**, v. 48, n. 0, p. 220–232, 2011. Acesso em: 2/3/2012.

SCHIMMSCHAR, S.; BLOK, K.; BOERMANS, T.; HERMELINK, A. Germany's path towards nearly zero-energy buildings—Enabling the greenhouse gas mitigation potential in the building stock. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3346–3360, 2011. Acesso em: 6/5/2014.

SCHNEIDER, J. The Path to Net-Zero-Energy Buildings - Net-Zero Energy, Energy Efficiency, Hvac, Green Design - eco-structure Magazine. **ECO-STRUCTURES**, v. Março, 2009. Disponível em: <<http://www.eco-structure.com/net-zero-energy/absolute-zero.aspx>>. Acesso em: 3/1/2012.

SCHNIEDERS, J. Passive Houses in South West Europe — A quantitative investigation of some passive and active space

conditioning techniques for highly energy efficient dwellings in the South West European region, 2009. Darmstadt: Darmstadt. Disponível em:

<[http://www.passivhaustagung.de/Passive\\_House\\_E/PH\\_MedClim.html](http://www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/PH_MedClim.html)>. .

SCHNIEDERS, J.; HERMELINK, A. CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. **Energy Policy**, v. 34, n. 2, p. 151–171, 2006. Acesso em: 4/4/2011.

SCHULZE, T.; EICKER, U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**, v. 56, p. 221–232, 2013. Acesso em: 2/12/2013.

SEIFERT, R. D. Resurrecting the Nullenergihuset in Denmark. In: D. Y. Goswami; Y. Zhao (Orgs.); **Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)**. p.3047–3050, 2008. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/jt114707h4902133/>>. Acesso em: 22/9/2011.

SHURCLIFF, W. A. Superinsulated Houses. **Annual Review of Energy**, v. 11, p. 1–24, 1986. Acesso em: 19/9/2011.

SOLAR DECATHLON. DOE Solar Decathlon: About Solar Decathlon. Disponível em: <<http://www.solardecathlon.gov/about.html>>. Acesso em: 7/11/2013.

SOLAR DECATHLON EUROPE. Historia y objetivos de la competición Solar Decathlon Europe | Solar Decathlon Europe. Disponível em: <<http://www.sdeurope.org/about/?lang=en>>. Acesso em: 7/11/2013.

SOLAR DECATHLON CHINA. SDChina. Disponível em: <<http://www.sdchina.org/>>. Acesso em: 7/11/2013.

SORMAN, A. H.; GIAMPIETRO, M. The energetic metabolism of societies and the degrowth paradigm: analyzing biophysical constraints and realities. **Journal of Cleaner Production**, v. 38, p. 80–93, 2013. Acesso em: 4/11/2013.

SRINIVASAN, R. S.; BRAHAM, W. W.; CAMPBELL, D. E.; CURCIJA, C. D. Re(De)fining Net Zero Energy: Renewable Energy Balance in environmental building design. **Building and Environment**, v. 47, p. 300–315, 2012. Acesso em: 19/9/2011.

STRENGERS, Y.; MALLER, C. Integrating health, housing and energy policies: social practices of cooling. **Building Research & Information**, v. 39, n. 2, p. 154–168, 2011. Acesso em: 20/11/2013.

SURLES, W.; HENZE, G. P. Evaluation of automatic priced based thermostat control for peak energy reduction under residential time-of-use utility tariffs. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 99–108, 2012. Acesso em: 2/12/2013.

TANAKA, N. A world without oil? , abr. 2011. Bridge Forum Dialogue. Disponível em: <[http://www.forum-dialogue.lu/binaries/hima.Speech/F6AA9D2EB121A1C6A2FCD62906C742C8/file\\_DE/confe%CC%81rence\\_a\\_world\\_without\\_oil\\_EN.pdf](http://www.forum-dialogue.lu/binaries/hima.Speech/F6AA9D2EB121A1C6A2FCD62906C742C8/file_DE/confe%CC%81rence_a_world_without_oil_EN.pdf)>. Acesso em: 7/5/2011.

TODOROVIĆ, M. S. BPS, energy efficiency and renewable energy sources for buildings greening and zero energy cities planning: Harmony and ethics of sustainability. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 180–189, 2012. Acesso em: 6/5/2014.

TORCELLINI, P.; SHANTI PLESS; DERU, M.; CRAWLEY, D. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. ,2006. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>>. .

TREADO, S.; LIU, X. Control Strategy for Minimizing Energy Usage with Economizer and Energy Recovery Systems. **ASHRAE Transactions**, v. 119, n. 1, p. 1–8, 2013. Acesso em: 5/2/2014.

VARELA, F.; GOMES, R.; JANNUZZI, G. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA NO BRASIL: PANORAMA DA ATUAL LEGISLAÇÃO. Anais VII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. **Anais...** , 2010. Disponível em: <<http://www.box.net/shared/vbe7phcthm>>. .

VENTILATION AND INDOOR AIR QUALITY TASK GROUP.  
 MECHANICAL VENTILATION WITH HEAT RECOVERY IN NEW HOMES.  
 ,2012. Disponível em:  
 <[http://www.zerocarbonhub.org/resourcefiles/viaqreport\\_web.pdf](http://www.zerocarbonhub.org/resourcefiles/viaqreport_web.pdf)>  
 ..

WALLGREN, C.; HÖJER, M. Eating energy--Identifying possibilities for reduced energy use in the future food supply system. **Energy Policy**, v. 37, n. 12, p. 5803–5813, 2009. Acesso em: 30/3/2011.

WANG, N.; ESRAM, T.; MARTINEZ, L.; MCCULLEY, M. A marketable all-electric solar house: A report of a Solar Decathlon project. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2860–2871, 2009. Acesso em: 6/4/2011.

WANG, N.; ZHANG, J.; XIA, X. Energy consumption of air conditioners at different temperature set points. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 412–418, 2013. Acesso em: 18/9/2013.

WHEELER, S. M.; SEGAR, R. B. Chapter 12 - Zero Net Energy At A Community Scale: UC Davis West Village. In: F. P. Sioshansi (Org.); **Energy Efficiency**. p.305–324, 2013. Boston: Academic Press.  
 Disponível em:  
 <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123978790000128>>. Acesso em: 19/5/2014.

WINZEN, J.; MARGGRAF-MICHEEL, C. Climate preferences and expectations and their influence on comfort evaluations in an aircraft cabin. **Building and Environment**, v. 64, p. 146–151, 2013. Acesso em: 23/4/2014.

ZHAI, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, Y.; et al. Comfort under personally controlled air movement in warm and humid environments. **Building and Environment**, v. 65, p. 109–117, 2013. Acesso em: 18/9/2013.

ZHONG, K.; KANG, Y. Applicability of air-to-air heat recovery ventilators in China. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 5–6, p. 830–840, 2009. Acesso em: 2/10/2013.

ZHOU, Y. P.; WU, J. Y.; WANG, R. Z. Performance of energy recovery ventilator with various weathers and temperature set-points. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 12, p. 1202–1210, 2007. Acesso em: 30/9/2013.

ZHU, L.; HURT, R.; CORREA, D.; BOEHM, R. Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house. **Energy**, v. 34, n. 9, p. 1043–1053, 2009. Acesso em: 30/3/2011.



## APÊNDICE A – Detalhamento do cálculo de transmitância térmica do envelope

### Cobertura

| Opção                      | Material                                       | Espessura | Espessura | Condutividade térmica do material | Transmitância da camada | Resistência da camada | Transmitância da cobertura sem filme |
|----------------------------|--|-----------|-----------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
|                            |  | [mm]      | [m]       | [W/mK]                            | [W/m <sup>2</sup> K]    | [m <sup>2</sup> K/W]  | [W/m <sup>2</sup> K]                 |
| 1                          | EXTERIOR                                       |           |           |                                   |                         |                       |                                      |
|                            | Telha zipada alumínio                          | 1,00      | 0,00      | 205,00                            | 205000,00               | 0,00                  |                                      |
|                            | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |           |           |                                   |                         | 0,17                  |                                      |
|                            | Spaceloft Aerogel                              | 60,00     | 0,06      | 0,01                              | 0,23                    | 4,44                  |                                      |
|                            | OSB  | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                      |
|                            | Lã de vidro                                    | 200,00    | 0,20      | 0,04                              | 0,19                    | 5,26                  |                                      |
|                            | OSB  | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                      |
|                            | INTERIOR                                       |           |           |                                   |                         | 10,15                 | 0,10                                 |
| 2                          | EXTERIOR                                       |           |           |                                   |                         |                       |                                      |
|                            | Telha zipada BEMO alumínio                     | 1,00      | 0,00      | 205,00                            | 205000,00               | 0,00                  |                                      |
|                            | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |           |           |                                   |                         | 0,17                  |                                      |
|                            | OSB  | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                      |
|                            | Lã de vidro                                    | 253,00    | 0,25      | 0,04                              | 0,15                    | 6,66                  |                                      |
|                            | OSB  | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                      |
|                            | INTERIOR                                       |           |           |                                   |                         | 7,10                  | 0,14                                 |
|                            | 3  | EXTERIOR  |           |                                   |                         |                       |                                      |
| Telha zipada BEMO alumínio |  | 1,00      | 0,00      | 205,00                            | 205000,00               | 0,00                  |                                      |

|   |  |        |      |        |           |      |      |
|---|--|--------|------|--------|-----------|------|------|
|   | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |        |      |        |           | 0,21 |      |
|   | OSB  | 18,00  | 0,02 | 0,13   | 7,22      | 0,14 |      |
|   | Lã de vidro                                    | 135,50 | 0,14 | 0,04   | 0,28      | 3,57 |      |
|   | OSB  | 18,00  | 0,02 | 0,13   | 7,22      | 0,14 |      |
|   | INTERIOR                                       |        |      |        |           | 4,05 | 0,25 |
| 4 | EXTERIOR                                       |        |      |        |           |      |      |
|   | Telha zipada                                   |        |      |        |           |      |      |
|   | BEMO   | 1,00   | 0,00 | 205,00 | 205000,00 | 0,00 |      |
|   | alumínio                                       |        |      |        |           |      |      |
|   | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |        |      |        |           | 0,21 |      |
|   | OSB  | 18,00  | 0,02 | 0,13   | 7,22      | 0,14 |      |
|   | Lã de vidro                                    | 19,50  | 0,02 | 0,04   | 1,95      | 0,51 |      |
|   | OSB  | 18,00  | 0,02 | 0,13   | 7,22      | 0,14 |      |
|   | INTERIOR                                       |        |      |        |           | 1,00 | 1,00 |
| 5 | EXTERIOR                                       |        |      |        |           |      |      |
|   | Telha zipada                                   |        |      |        |           |      |      |
|   | BEMO   | 1,00   | 0,00 | 205,00 | 205000,00 | 0,00 |      |
|   | alumínio                                       |        |      |        |           |      |      |
|   | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |        |      |        |           | 0,21 |      |
|   | OSB  | 18,00  | 0,02 | 0,13   | 7,22      | 0,14 |      |
|   | CAMERA DE AR                                   | 200,00 | 0,20 | 0,00   | 0,00      | 0,21 |      |
|   | OSB  | 18,00  | 0,02 | 0,13   | 7,22      | 0,14 |      |
|   | INTERIOR                                       |        |      |        |           | 0,70 | 1,43 |
| 6 | EXTERIOR                                       |        |      |        |           |      |      |
|   | Telha zipada                                   |        |      |        |           |      |      |
|   | BEMO   | 1,00   | 0,00 | 205,00 | 205000,00 | 0,00 |      |
|   | alumínio                                       |        |      |        |           |      |      |
|   | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |        |      |        |           | 0,21 |      |
|   | OSB  | 18,00  | 0,02 | 0,13   | 7,22      | 0,14 |      |
|   | INTERIOR                                       |        |      |        |           | 0,35 | 2,87 |



| Parede           |                   |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Opção            | Material          | Espessura | Espessura | Condutividade térmica do material | Transmitância da camada | Resistência da camada | Transmitância da parede sem filme |
|                  |                   | [mm]      | [m]       | [W/mK]                            | [W/m²K]                 | [m²K/W]               | [W/m²K]                           |
| 1                | EXTERIOR          |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|                  | Chapa cimentícia  | 10,00     | 0,01      | 0,65                              | 65,00                   | 0,02                  |                                   |
|                  | EXTERIOR          |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|                  | Spaceloft Aerogel | 60,00     | 0,06      | 0,01                              | 0,23                    | 4,44                  |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
|                  | Lã de vidro       | 60,00     | 0,06      | 0,04                              | 0,63                    | 1,58                  |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
|                  | Lã de vidro       | 40,00     | 0,04      | 0,04                              | 0,95                    | 1,05                  |                                   |
| Chapa cimentícia | 10,00             | 0,01      | 0,65      | 65,00                             | 0,02                    |                       |                                   |
| INTERIOR         |                   |           |           |                                   |                         | 7,38                  | 0,14                              |
| 2                | EXTERIOR          |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
|                  | Lã de vidro       | 189,50    | 0,19      | 0,04                              | 0,20                    | 4,99                  |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
| INTERIOR         |                   |           |           |                                   |                         | 5,26                  | 0,19                              |
| 3                | EXTERIOR          |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
|                  | Lã de vidro       | 108,50    | 0,11      | 0,04                              | 0,35                    | 2,86                  |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
| INTERIOR         |                   |           |           |                                   |                         | 3,13                  | 0,32                              |
| 4                | EXTERIOR          |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
|                  | Lã de vidro       | 27,50     | 0,03      | 0,04                              | 1,38                    | 0,72                  |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 7,22                    | 0,14                  |                                   |
| INTERIOR         |                   |           |           |                                   |                         | 1,00                  | 1,00                              |
| 5                | EXTERIOR          |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 3,47                    | 0,14                  |                                   |
|                  | camada de ar      | 60,00     |           |                                   |                         | 0,17                  |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 3,47                    | 0,14                  |                                   |
| INTERIOR         |                   |           |           |                                   |                         | 0,45                  | 2,24                              |
| 6                | EXTERIOR          |           |           |                                   |                         |                       |                                   |
|                  | OSB               | 18,00     | 0,02      | 0,13                              | 3,47                    | 0,14                  |                                   |

| INTERIOR |  |          |          |                                     |                         |                       |                                 | 0,14 | 3,47 |
|----------|--|----------|----------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|------|------|
|          |  | Piso     |          |                                     |                         |                       |                                 |      |      |
| Opção    | Material                                       | Espesura | Espesura | Condutividade e térmica do material | Transmitância da camada | Resistência da camada | Transmitância do piso sem filme |      |      |
|          |  | [mm]     | [m]      | [W/mK]                              | [W/m <sup>2</sup> K]    | [m <sup>2</sup> K/W]  | [W/m <sup>2</sup> K]            |      |      |
| 1        | EXTERIOR                                       |          |          |                                     |                         |                       |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |
|          | Lã de vidro                                    | 200,00   | 0,20     | 0,04                                | 0,19                    | 5,26                  |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |
|          | Spaceloft Aerogel                              | 40,00    | 0,04     | 0,01                                | 0,34                    | 2,96                  |                                 |      |      |
|          | Assoalho de madeira                            | 25,00    | 0,03     | 0,15                                | 6,00                    | 0,17                  |                                 |      |      |
|          | INTERIOR                                       |          |          |                                     |                         | 8,67                  |                                 |      | 0,12 |
| 2        | EXTERIOR                                       |          |          |                                     |                         |                       |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |
|          | Lã de vidro                                    | 207,50   | 0,21     | 0,04                                | 0,18                    | 5,46                  |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |
|          | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |          |          |                                     |                         | 0,21                  |                                 |      |      |
|          | Assoalho de madeira                            | 25,00    | 0,03     | 0,15                                | 6,00                    | 0,17                  |                                 |      |      |
|          | INTERIOR                                       |          |          |                                     |                         | 6,11                  |                                 |      | 0,16 |
| 3        | EXTERIOR                                       |          |          |                                     |                         |                       |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |
|          | Lã de vidro                                    | 110,50   | 0,11     | 0,04                                | 0,34                    | 2,91                  |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |
|          | Camada de ar horizontal fluxo dentro para fora |          |          |                                     |                         | 0,21                  |                                 |      |      |
|          | Assoalho de madeira                            | 25,00    | 0,03     | 0,15                                | 6,00                    | 0,17                  |                                 |      |      |
|          | INTERIOR                                       |          |          |                                     |                         | 3,56                  |                                 |      | 0,28 |
| 4        | EXTERIOR                                       |          |          |                                     |                         |                       |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |
|          | Lã de vidro                                    | 13,00    | 0,01     | 0,04                                | 2,92                    | 0,34                  |                                 |      |      |
|          | OSB  | 18,00    | 0,02     | 0,13                                | 7,22                    | 0,14                  |                                 |      |      |

|   |   |        |      |      |      |      |      |
|---|---|--------|------|------|------|------|------|
|   | Camada de ar horizontal<br>fluxo dentro para fora |        |      |      |      | 0,21 |      |
|   | Assoalho de madeira                               | 25,00  | 0,03 | 0,15 | 6,00 | 0,17 |      |
|   | INTERIOR  |        |      |      |      | 1,00 | 1,00 |
| 5 | EXTERIOR  |        |      |      |      |      |      |
|   | Assoalho de madeira                               | 25,00  | 0,03 | 0,15 | 6,00 | 0,17 |      |
|   | Camada de ar horizontal<br>fluxo dentro para fora |        |      |      |      | 0,17 |      |
|   | OSB   | 18,00  | 0,02 | 0,13 | 7,22 | 0,14 |      |
|   | CAMERA DE AR                                      | 200,00 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,21 |      |
|   | OSB   | 18,00  | 0,02 | 0,13 | 7,22 | 0,14 |      |
|   | INTERIOR  |        |      |      |      | 0,82 | 1,21 |
| 6 | EXTERIOR  |        |      |      |      |      |      |
|   | OSB   | 18,00  | 0,02 | 0,13 | 7,22 | 0,14 |      |
|   | Camada de ar horizontal<br>fluxo dentro para fora |        |      |      |      | 0,17 |      |
|   | Assoalho de madeira                               | 25,00  | 0,03 | 0,15 | 6,00 | 0,17 |      |
|   | INTERIOR  |        |      |      |      | 0,48 | 2,10 |
| 6 | EXTERIOR  |        |      |      |      |      |      |
|   | OSB   | 18,00  | 0,02 | 0,13 | 7,22 | 0,14 |      |
|   | Camada de ar horizontal<br>fluxo dentro para fora |        |      |      |      | 0,17 |      |
|   | Assoalho de madeira                               | 25,00  | 0,03 | 0,15 | 6,00 | 0,17 |      |
|   | INTERIOR  |        |      |      |      | 0,48 | 2,10 |



## APÊNDICE B – Detalhamento do cálculo de transmitância térmica da esquadria

|                      | Faixas | Material | Espessura<br>[m] | Condutividade<br>térmica<br>[W/mK] | Resistência<br>térmica<br>[m <sup>2</sup> K/W] |
|----------------------|--------|----------|------------------|------------------------------------|--|
| Camada 1<br>EXTERIOR | 1      | PVC      | 0,006            | 0,20                               | 0,03   |
|                      | 2      | PVC      | 0,006            | 0,20                               | 0,03   |
|                      | 3      | PVC      | 0,006            | 0,20                               | 0,03   |
|                      | 4      | PVC      | 0,007            | 0,20                               | 0,03   |
|                      | 5      | PVC      | 0,004            | 0,20                               | 0,02   |
|                      | 6      | PVC      | 0,004            | 0,20                               | 0,02   |
|                      | 7      | PVC      | 0,012            | 0,20                               | 0,06   |
| Camada 2             | 1      | Ar       | 0,007            | 0,03                               | 0,25   |
|                      | 2      | Borracha | 0,007            | 0,42                               | 0,02   |
|                      | 3      | Ar       | 0,007            | 0,03                               | 0,25   |
|                      | 4      | ar       | 0,029            | 0,03                               | 1,12   |
|                      | 5      | ar       | 0,015            | 0,03                               | 0,58   |
|                      | 6      | ar       | 0,038            | 0,03                               | 1,45   |
|                      | 7      | Ar       | 0,026            | 0,03                               | 0,98   |
| Camada 3             | 1      | Vidro    | 0,008            | 0,90                               | 0,01   |
|                      | 2      | Vidro    | 0,008            | 0,90                               | 0,01   |
|                      | 3      | Vidro    | 0,008            | 0,90                               | 0,01   |
|                      | 4      | PVC      | 0,014            | 0,20                               | 0,07   |
|                      | 5      | Aço      | 0,256            | 16,00                              | 0,02   |
|                      | 6      | Aço      | 0,003            | 16,00                              | 0,00   |
|                      | 7      | PVC      | 0,012            | 0,20                               | 0,06   |
| Camada 4             | 1      | ar       | 0,012            | 0,03                               | 0,46   |
|                      | 2      | ar       | 0,012            | 0,03                               | 0,46   |
|                      | 3      | Aço      | 0,012            | 16,00                              | 0,00   |
|                      | 4      | -        | -                | -                                  | -  |
|                      | 5      | PVC      | 0,005            | 0,20                               | 0,03   |
|                      | 6      | -        | -                | -                                  | -  |
|                      | 7      | -        | -                | -                                  | -  |
| Camada 5             | 1      | Vidro    | 0,006            | 0,90                               | 0,01   |
|                      | 2      | Vidro    | 0,006            | 0,90                               | 0,01   |
|                      | 3      | Vidro    | 0,006            | 0,90                               | 0,01   |
|                      | 4      | -        | -                | -                                  | -  |
|                      | 5      | -        | -                | -                                  | -  |
|                      | 6      | -        | -                | -                                  | -  |
|                      | 7      | -        | -                | -                                  | -  |

|          |   |          |       |      |      |
|----------|---|----------|-------|------|------|
| Camada 6 | 1 | ar       | 0,007 | 0,03 | 0,25 |
|          | 2 | Borracha | 0,007 | 0,42 | 0,02 |
|          | 3 | ar       | 0,007 | 0,03 | 0,25 |
|          | 4 | -        | -     | -    | -    |
|          | 5 | -        | -     | -    | -    |
|          | 6 | -        | -     | -    | -    |
|          | 7 | -        | -     | -    | -    |
| Camada 7 | 1 | PVC      | 0,005 | 0,20 | 0,02 |
| INTERIOR | 2 | PVC      | 0,005 | 0,20 | 0,02 |
|          | 3 | PVC      | 0,005 | 0,20 | 0,02 |
|          | 4 | -        | -     | -    | -    |
|          | 5 | -        | -     | -    | -    |
|          | 6 | -        | -     | -    | -    |
|          | 7 | -        | -     | -    | -    |

## Subtotais e Total

| Faixas | Resistência<br>térmica parcial<br>[m <sup>2</sup> K/W] | Fração | Resistência<br>térmica<br>ponderada<br>[m <sup>2</sup> K/W] |
|--------|--|--------|---|
| 1      | 1,04   | 0,09   | 0,10  |
| 2      | 0,56   | 0,07   | 0,04  |
| 3      | 0,58   | 0,09   | 0,05  |
| 4      | 1,23   | 0,21   | 0,26  |
| 5      | 0,63   | 0,05   | 0,03  |
| 6      | 1,47   | 0,32   | 0,47  |
| 7      | 1,11   | 0,17   | 0,19  |
|        |  | Total  | 1,13  |

Nota: Rsi significa resistência térmica nas unidades do sistema internacional.

## APÊNDICE C – Balanços energéticos mensais

### MAIOR BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA VENTILAÇÃO NATURAL AUTOMÁTICA EM BELÉM

1ª ETAPA: SOMA ANUAL 8 GRAUS HORA DE DESCONFORTO TÉRMICO  
(Sombreamento completo, sombreando áreas transparentes e paredes, e  
nível 2 de transmitância térmica, com valores de 0,14, 0,19 e 0,16 W/m<sup>2</sup>K  
para cobertura, parede e piso, respectivamente)

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Operação de brises [kWh] | Operação de janelas [kWh] | Consumo chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração fotovoltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 0                        | 1                         | 52                     | 217                 | 1135                       | 918           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 0                        | 1                         | 47                     | 196                 | 975                        | 779           |
| Março        | 42               | 121                | 0                        | 1                         | 52                     | 217                 | 1103                       | 886           |
| Abril        | 41               | 118                | 0                        | 1                         | 50                     | 210                 | 1053                       | 843           |
| Maiο         | 42               | 121                | 0                        | 1                         | 52                     | 216                 | 1289                       | 1073          |
| Junho        | 41               | 118                | 0                        | 1                         | 50                     | 209                 | 1292                       | 1082          |
| Julho        | 42               | 121                | 0                        | 1                         | 52                     | 216                 | 1490                       | 1274          |
| Agosto       | 42               | 121                | 0                        | 1                         | 52                     | 216                 | 1578                       | 1361          |
| Setembro     | 41               | 118                | 0                        | 1                         | 50                     | 209                 | 1420                       | 1211          |
| Outubro      | 42               | 121                | 0                        | 1                         | 52                     | 216                 | 1532                       | 1316          |
| Novembro     | 41               | 118                | 0                        | 1                         | 50                     | 210                 | 1419                       | 1210          |
| Dezembro     | 42               | 121                | 0                        | 1                         | 52                     | 217                 | 1345                       | 1129          |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>2</b>                 | <b>12</b>                 | <b>608</b>             | <b>2548</b>         | <b>15631</b>               | <b>13083</b>  |

MENOR BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA VENTILAÇÃO NATURAL  
AUTOMÁTICA EM BELÉM

1ª ETAPA: SOMA ANUAL DE 8206 GRAUS HORA DE DESCONFORTO TÉRMICO  
(Sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica, com valores de  
1,86W/m<sup>2</sup>K, 3,47 W/m<sup>2</sup>K e 1,31 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso,  
respectivamente).

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Operação de janelas [kWh] | Consumo chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração fotovoltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 1                         | 52                     | 216                 | 1135                       | 918           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 1                         | 47                     | 196                 | 975                        | 780           |
| Março        | 42               | 121                | 1                         | 52                     | 217                 | 1103                       | 886           |
| Abril        | 41               | 118                | 1                         | 50                     | 209                 | 1053                       | 843           |
| Maiο         | 42               | 121                | 1                         | 52                     | 217                 | 1289                       | 1073          |
| Junho        | 41               | 118                | 1                         | 50                     | 209                 | 1292                       | 1082          |
| Julho        | 42               | 121                | 1                         | 52                     | 216                 | 1490                       | 1274          |
| Agosto       | 42               | 121                | 1                         | 52                     | 216                 | 1578                       | 1361          |
| Setembro     | 41               | 118                | 1                         | 50                     | 210                 | 1420                       | 1211          |
| Outubro      | 42               | 121                | 1                         | 52                     | 217                 | 1532                       | 1316          |
| Novembro     | 41               | 118                | 1                         | 50                     | 210                 | 1419                       | 1209          |
| Dezembro     | 42               | 121                | 1                         | 52                     | 217                 | 1345                       | 1129          |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>15</b>                 | <b>608</b>             | <b>2549</b>         | <b>15631</b>               | <b>13082</b>  |

MAIOR BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL EM  
 BELÉM  
 3ª ETAPA: OPERAÇÃO ADAPTATIVA COM 80% DE ACEITABILIDADE SEGUNDO  
 ASHRAE 2010  
 (Sombreamento completo e o nível 1 de transmitância térmica, com valores  
 de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso,  
 respectivamente)

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Ventiladores [kWh] | Refrigeração [kWh] | Operação de brises [kWh] | Chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração fotovoltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|----------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 27                 | 61                 | 0,0                      | 52             | 303                 | 1135                       | 832           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 24                 | 44                 | 0,0                      | 47             | 263                 | 975                        | 712           |
| Março        | 42               | 121                | 27                 | 44                 | 0,0                      | 52             | 286                 | 1103                       | 817           |
| Abril        | 41               | 118                | 26                 | 33                 | 0,0                      | 50             | 267                 | 1053                       | 786           |
| Maiο         | 42               | 121                | 27                 | 40                 | 0,0                      | 52             | 282                 | 1289                       | 1007          |
| Junho        | 41               | 118                | 26                 | 37                 | 0,0                      | 50             | 271                 | 1292                       | 1021          |
| Julho        | 42               | 121                | 27                 | 39                 | 0,0                      | 52             | 281                 | 1490                       | 1209          |
| Agosto       | 42               | 121                | 27                 | 41                 | 0,0                      | 52             | 283                 | 1578                       | 1295          |
| Setembro     | 41               | 118                | 26                 | 42                 | 0,0                      | 50             | 277                 | 1420                       | 1144          |
| Outubro      | 42               | 121                | 27                 | 41                 | 0,0                      | 52             | 283                 | 1532                       | 1249          |
| Novembro     | 41               | 118                | 26                 | 39                 | 0,0                      | 50             | 273                 | 1419                       | 1146          |
| Dezembro     | 42               | 121                | 27                 | 35                 | 0,0                      | 52             | 277                 | 1345                       | 1068          |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>314</b>         | <b>496</b>         | <b>0,1</b>               | <b>608</b>     | <b>3345</b>         | <b>15631</b>               | <b>12286</b>  |

MENOR BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL EM  
BELEM

1ª ETAPA: OPERAÇÃO FIXA 21 °C- 24 °C SOMBREAMENTO NULO  
(Sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica, com valores de  
1,86W/m<sup>2</sup>K, 3,47 W/m<sup>2</sup>K e 1,31 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso,  
respectivamente).

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Ventiladores [kWh] | Refrigeração [kWh] | Chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração fotovoltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 268                | 421                | 52             | 904                 | 1135                       | 231           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 242                | 403                | 47             | 840                 | 975                        | 136           |
| Março        | 42               | 121                | 268                | 466                | 52             | 949                 | 1103                       | 153           |
| Abril        | 41               | 118                | 259                | 408                | 50             | 876                 | 1053                       | 177           |
| Mai          | 42               | 121                | 268                | 459                | 52             | 942                 | 1289                       | 348           |
| Junho        | 41               | 118                | 259                | 427                | 50             | 894                 | 1292                       | 397           |
| Julho        | 42               | 121                | 268                | 446                | 52             | 929                 | 1490                       | 561           |
| Agosto       | 42               | 121                | 268                | 461                | 52             | 944                 | 1578                       | 633           |
| Setembro     | 41               | 118                | 259                | 464                | 50             | 932                 | 1420                       | 489           |
| Outubro      | 42               | 121                | 268                | 472                | 52             | 955                 | 1532                       | 577           |
| Novembro     | 41               | 118                | 259                | 464                | 50             | 931                 | 1419                       | 488           |
| Dezembro     | 42               | 121                | 268                | 441                | 52             | 924                 | 1345                       | 421           |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>3153</b>        | <b>5334</b>        | <b>608</b>     | <b>11021</b>        | <b>15631</b>               | <b>4610</b>   |

MAIOR BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL EM CURITIBA

3ª ETAPA: OPERAÇÃO ADAPTATIVA COM 80% DE ACEITABILIDADE  
(Sombreamento completo e o nível 1 de transmitância térmica, com valores de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente)

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Ventiladores [kWh] | Aquecimento [kWh] | Refrigeração [kWh] | Operação de brises [kWh] | Chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração fotovoltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|----------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 47                 | 9                 | 22                 | 0,006                    | 52             | 293                 | 1149                       | 856           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 43                 | 2                 | 25                 | 0,000                    | 47             | 264                 | 1127                       | 863           |
| Março        | 42               | 121                | 47                 | 16                | 14                 | 0,006                    | 52             | 292                 | 1101                       | 809           |
| Abril        | 41               | 118                | 46                 | 31                | 0                  | 0,006                    | 50             | 285                 | 838                        | 554           |
| Maió         | 42               | 121                | 47                 | 58                | 0                  | 0,006                    | 52             | 321                 | 849                        | 528           |
| Junho        | 41               | 118                | 46                 | 65                | 1                  | 0,006                    | 50             | 320                 | 710                        | 390           |
| Julho        | 42               | 121                | 47                 | 42                | 0                  | 0,006                    | 52             | 304                 | 837                        | 532           |
| Agosto       | 42               | 121                | 47                 | 46                | 0                  | 0,006                    | 52             | 308                 | 949                        | 641           |
| Setembro     | 41               | 118                | 46                 | 57                | 0                  | 0,006                    | 50             | 311                 | 858                        | 547           |
| Outubro      | 42               | 121                | 47                 | 28                | 8                  | 0,006                    | 52             | 299                 | 906                        | 606           |
| Novembro     | 41               | 118                | 46                 | 30                | 0                  | 0,006                    | 50             | 284                 | 1257                       | 973           |
| Dezembro     | 42               | 121                | 47                 | 15                | 15                 | 0,006                    | 52             | 293                 | 1044                       | 751           |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>556</b>         | <b>399</b>        | <b>85</b>          | <b>0,1</b>               | <b>608</b>     | <b>3574</b>         | <b>11623</b>               | <b>8049</b>   |

MENOR BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL EM  
CURITIBA

1ª ETAPA: OPERAÇÃO FIXA 21 °C- 24 °C

(Sombreamento nulo e nível 6 de transmitância térmica, com valores de 1,86W/m<sup>2</sup>K, 3,47 W/m<sup>2</sup>K e 1,31 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente).

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Ventiladores [kWh] | Aquecimento [kWh] | Refrigeração [kWh] | Chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração fotovoltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 189                | 60                | 66                 | 52             | 530                 | 1149                       | 618           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 171                | 29                | 92                 | 47             | 487                 | 1127                       | 640           |
| Março        | 42               | 121                | 189                | 54                | 81                 | 52             | 540                 | 1101                       | 561           |
| Abril        | 41               | 118                | 183                | 111               | 44                 | 50             | 546                 | 838                        | 293           |
| Maiο         | 42               | 121                | 189                | 224               | 21                 | 52             | 649                 | 849                        | 200           |
| Junho        | 41               | 118                | 183                | 280               | 5                  | 50             | 676                 | 710                        | 33            |
| Julho        | 42               | 121                | 189                | 207               | 19                 | 52             | 630                 | 837                        | 207           |
| Agosto       | 42               | 121                | 189                | 209               | 38                 | 52             | 652                 | 949                        | 297           |
| Setembro     | 41               | 118                | 183                | 234               | 22                 | 50             | 647                 | 858                        | 211           |
| Outubro      | 42               | 121                | 189                | 139               | 56                 | 52             | 600                 | 906                        | 306           |
| Novembro     | 41               | 118                | 183                | 94                | 33                 | 50             | 518                 | 1257                       | 739           |
| Dezembro     | 42               | 121                | 189                | 74                | 80                 | 52             | 558                 | 1044                       | 485           |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>2228</b>        | <b>1714</b>       | <b>556</b>         | <b>608</b>     | <b>7033</b>         | <b>11623</b>               | <b>4591</b>   |

BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL COM  
 RECUPERAÇÃO DE CALOR SENSÍVEL E LATENTE EM BELÉM. 3ª ETAPA:  
 OPERAÇÃO FIXA 21 °C- 24 °C

(Sombreamento completo e o nível 1 de transmitância térmica, com valores de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso, respectivamente)

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Ventiladores [kWh] | Refrigeração [kWh] | Recuperação de calor [kWh] | Operação de brises [kWh] | Chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração foto-voltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|---------------------|-----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 69                 | 153                | 65                         | 0                        | 52             | 502                 | 1135                        | 633           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 62                 | 144                | 63                         | 0                        | 47             | 463                 | 975                         | 512           |
| Março        | 42               | 121                | 69                 | 164                | 74                         | 0                        | 52             | 522                 | 1103                        | 581           |
| Abril        | 41               | 118                | 67                 | 150                | 71                         | 0                        | 50             | 497                 | 1053                        | 556           |
| Mai          | 42               | 121                | 69                 | 162                | 73                         | 0                        | 52             | 519                 | 1289                        | 770           |
| Junho        | 41               | 118                | 67                 | 155                | 65                         | 0                        | 50             | 494                 | 1292                        | 798           |
| Julho        | 42               | 121                | 69                 | 160                | 68                         | 0                        | 52             | 512                 | 1490                        | 978           |
| Agosto       | 42               | 121                | 69                 | 163                | 70                         | 0                        | 52             | 516                 | 1578                        | 1061          |
| Setembro     | 41               | 118                | 67                 | 161                | 69                         | 0                        | 50             | 506                 | 1420                        | 915           |
| Outubro      | 42               | 121                | 69                 | 165                | 68                         | 0                        | 52             | 517                 | 1532                        | 1015          |
| Novembro     | 41               | 118                | 67                 | 159                | 67                         | 0                        | 50             | 501                 | 1419                        | 918           |
| Dezembro     | 42               | 121                | 69                 | 157                | 69                         | 0                        | 52             | 510                 | 1345                        | 836           |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>810</b>         | <b>1893</b>        | <b>820</b>                 | <b>0</b>                 | <b>608</b>     | <b>6057</b>         | <b>15631</b>                | <b>9574</b>   |

**BALANÇO ENERGÉTICO ANUAL DA CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL COM  
RECUPERAÇÃO DE CALOR SENSÍVEL E LATENTE EM CURITIBA. 3ª ETAPA:  
OPERAÇÃO FIXA 21 °C- 24 °C. SOMBREAMENTO COMPLETO,  
(Sombreamento completo e o nível 1 de transmitância térmica, com valores  
de 0,10 W/m<sup>2</sup>K, 0,13 W/m<sup>2</sup>K e 0,11 W/m<sup>2</sup>K para cobertura, parede e piso,  
respectivamente)**

|              | Iluminação [kWh] | Equipamentos [kWh] | Ventiladores [kWh] | Aquecimento [kWh] | Refrigeração [kWh] | Recuperação de calor [kWh] | Operação de brises [kWh] | Chuveiro [kWh] | Consumo total [kWh] | Geração fotovoltaica [kWh] | Balanço [kWh] |
|--------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Janeiro      | 42               | 121                | 66                 | 17                | 24                 | 64                         | 0                        | 52             | 386                 | 1149                       | 763           |
| Fevereiro    | 38               | 110                | 59                 | 2                 | 36                 | 55                         | 0                        | 47             | 347                 | 1127                       | 780           |
| Março        | 42               | 121                | 66                 | 9                 | 30                 | 62                         | 0                        | 52             | 381                 | 1101                       | 719           |
| Abril        | 41               | 118                | 63                 | 26                | 9                  | 63                         | 0                        | 50             | 370                 | 838                        | 468           |
| Mai          | 42               | 121                | 66                 | 64                | 4                  | 70                         | 0                        | 52             | 419                 | 849                        | 430           |
| Junho        | 41               | 118                | 63                 | 83                | 1                  | 68                         | 0                        | 50             | 424                 | 710                        | 285           |
| Julho        | 42               | 121                | 66                 | 61                | 1                  | 65                         | 0                        | 52             | 408                 | 837                        | 429           |
| Agosto       | 42               | 121                | 66                 | 55                | 8                  | 71                         | 0                        | 52             | 414                 | 949                        | 535           |
| Setembro     | 41               | 118                | 63                 | 71                | 5                  | 69                         | 0                        | 50             | 417                 | 858                        | 441           |
| Outubro      | 42               | 121                | 66                 | 38                | 15                 | 69                         | 0                        | 52             | 402                 | 906                        | 503           |
| Novembro     | 41               | 118                | 63                 | 27                | 10                 | 64                         | 0                        | 50             | 373                 | 1257                       | 885           |
| Dezembro     | 42               | 121                | 66                 | 15                | 26                 | 65                         | 0                        | 52             | 387                 | 1044                       | 657           |
| <b>ANUAL</b> | <b>497</b>       | <b>1430</b>        | <b>772</b>         | <b>469</b>        | <b>168</b>         | <b>785</b>                 | <b>0</b>                 | <b>608</b>     | <b>4729</b>         | <b>11623</b>               | <b>6895</b>   |