



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

Leonardo Mazzaferro

**ANÁLISE DAS RECOMENDAÇÕES DA ASHRAE STANDARD
90.1 PARA A ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS**

Florianópolis, Outubro de 2015.

Leonardo Mazzaferro

**ANÁLISE DAS RECOMENDAÇÕES DA ASHRAE STANDARD
90.1 PARA A ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Florianópolis, Outubro de 2015.

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

Mazzaferro, Leonardo

Análise das recomendações da ASHRAE Standard 90.1 para a
envoltória de edificações comerciais / Leonardo Mazzaferro ;
orientador, Roberto Lamberts - Florianópolis, SC, 2016.
97 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Envolvória de edificações
comerciais. 3. ASHRAE Standard 90.1. 4. Simulação
termoenergética. I. Lamberts, Roberto. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Leonardo Mazzaferro

**ANÁLISE DAS RECOMENDAÇÕES DA ASHRAE STANDARD
90.1 PARA A ENVOLTÓRIA DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Florianópolis, 19 de outubro de 2015.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Roberto Lamberts, Ph.D.
Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Enedir Ghisi, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Prof. Nathan Mendes, Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Agradecimentos

Aos meus pais, Elisabetta e Piero, por estarem sempre ao meu lado e proporcionarem um ambiente propício para meu amadurecimento.

Ao professor e orientador Roberto Lamberts, pelos inúmeros ensinamentos e contribuições ímpares.

Aos meus colegas e amigos Ana Paula Melo, Marcio Sorgato e Rogério Versage por estarem sempre disponíveis a ajudar e por terem compartilhado comigo valiosas lições.

Aos membros da banca examinadora, Enedir Ghisi, Martin Gabriel Ordenes Mizgier e Nathan Mendes por aceitarem o convite para participar da banca de avaliação deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq), pela bolsa de estudo concedida no período do mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Multum in parvo

RESUMO

O consumo crescente de energia elétrica no mundo levanta preocupações relacionadas aos impactos ambientais e ao esgotamento dos recursos energéticos. As edificações são responsáveis por uma parcela consistente do consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo. Visando maior eficiência energética em edificações, são elaborados regulamentos e normas. Neste contexto está inserida a *ASHRAE Standard 90.1*, norma norte americana que estabelece requisitos mínimos para eficiência energética em edificações. O objetivo deste trabalho é analisar as recomendações da *ASHRAE Standard 90.1* relacionadas à envoltória de edificações comerciais. O programa de simulação computacional *EnergyPlus* foi escolhido para efetuar as simulações do trabalho. Primeiramente, definiu-se o modelo de referência de edificação comercial de escritórios a ser utilizado. A envoltória do modelo de referência foi definida de acordo com as recomendações da *ASHRAE Standard 90.1*. Em seguida, foram impostas variações na envoltória, nas dimensões e na densidade de carga interna do modelo de referência a fim de verificar seus impactos no consumo de energia elétrica da edificação. Independentemente da envoltória, verificou-se que a área de pavimento é inversamente proporcional ao consumo normalizado pela área da edificação, devido à maior influência do clima em edificações menores nos três climas analisados (Rio de Janeiro, Florianópolis e Curitiba). A análise dos ganhos de calor de zonas do modelo de referência permitiu obter as superfícies da envoltória pelas quais ocorrem os maiores ganhos e perdas de calor. As variações com vidro duplo e isolamento na envoltória obtiveram consumos de energia elétrica inferiores, quando comparadas às sem isolamento e vidro comum. A utilização de vidro de controle solar, associada a uma envoltória sem isolamento refletiu em consumos ainda menores. A adoção do vidro laminado de controle solar mostrou-se positiva em todos os climas, diminuindo os ganhos por radiação através das aberturas e possibilitando perdas benéficas de calor para o exterior da edificação devido à sua transmitância térmica elevada. De modo geral, o vidro apresentou grande influência nas trocas de calor entre o ambiente interno e externo. As diferentes densidades de carga internas afetaram o consumo de energia elétrica da edificação de acordo com a envoltória e o clima definido. A análise dos resultados demonstra que as recomendações de envoltória da *ASHRAE Standard 90.1* não são as mais adequadas para edificações comerciais em climas quentes,

especialmente em casos de densidades de carga interna altas. As recomendações referentes à envoltória de edificações comerciais poderiam ser elaboradas de maneira mais específica para cada zona climática e densidade de carga térmica interna, sem necessariamente priorizar o uso de isolamento térmico.

Palavras-chave: envoltória de edificações comerciais, ASHRAE Standard 90.1, simulação termo-energética.

ABSTRACT

The growing consumption of electricity in the world raises concerns related to environmental impacts and depletion of energy resources. Buildings are responsible for a consistent share of electricity consumption in Brazil and worldwide. In this scenario, standards and regulations aimed at energy efficiency in buildings have been prepared. In this context there is the ASHRAE Standard 90.1, a North American standard that establishes minimum requirements for energy efficiency in buildings. The objective of this study is to analyze the ASHRAE Standard 90.1 envelope recommendations for commercial buildings. The thermal energy computer simulation program EnergyPlus 8.3 was used for this study. First, the reference model of office commercial building was defined in accordance with the recommendations of ASHRAE Standard 90.1. Changes were imposed on the envelope, dimensions and internal load density of the reference model in order to verify their impact on the energy consumption of the building. Regardless of the envelope, it was found that the floor area is inversely proportional to the normalized consumption by area of the building, due to greater influence of climate in smaller buildings, in the three climates analyzed (Rio de Janeiro, Florianopolis and Curitiba). The analysis of heat gains allowed obtaining the surfaces of the envelope by which occur higher gain and heat losses. The variations with double glazing and insulation in envelopment achieved lower power consumption compared to uninsulated and ordinary glass. The use of solar control glass associated with an envelope without isolation reflected in even lower consumption. The adoption of solar control laminated glass proved to be effective in all climates, reducing the radiation gains through the openings of the building while enabling beneficial losses to the outside due to its high thermal transmittance. Generally the glass had a great influence on heat exchange between the internal and external environment. The different internal loading densities affected the electricity consumption of the building in accordance with the envelope and climate. The analysis shows that the ASHRAE Standard 90.1 envelope recommendations are not the most suitable for commercial buildings in hot climates, especially in cases of high internal charge densities. The recommendations concerning commercial building envelope could be designed more specifically for each climate zone and internal heat load density without always prioritize the use of thermal insulation.

Keywords: commercial building envelope, ASHRAE Standard 90.1, thermal energy simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1.Zoneamento bioclimático brasileiro..... | 30 |
| Figura 2.2. Zoneamento climático brasileiro segundo a ASHRAE Standard 169 | 33 |
| Figura 2.3. Registros e certificações LEED no Brasil..... | 34 |
| Figura 3.1. Modelo 3D do modelo de referência..... | 50 |
| Figura 3.2. Divisão dos pavimentos do modelo de referência em zonas térmicas. | 51 |
| Figura 3.3. Rotinas de iluminação e de equipamentos para dias de semana e sábado. | 52 |
| Figura 3.4. Curva de desempenho do sistema de condicionamento em cargas parciais | 55 |
| Figura 3.5 Esquema de balanço térmico em um ambiente. | 61 |
| Figura 4.1. Temperaturas de bulbo seco e umidade relativa ao longo do ano no Rio de Janeiro. | 63 |
| Figura 4.2. Temperaturas de bulbo seco e umidade relativa ao longo do ano em Florianópolis. | 64 |
| Figura 4.3. Temperaturas de bulbo seco e umidade ao longo do ano em Curitiba..... | 64 |
| Figura 4.4. Correlação entre graus-hora dos climas e consumo de energia elétrica do modelo de referência..... | 66 |
| Figura 4.5. Balanço térmico anual para Rio de Janeiro..... | 70 |
| Figura 4.6. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Ashrae ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Rio de Janeiro..... | 71 |
| Figura 4.7. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-1 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Rio de Janeiro..... | 71 |
| Figura 4.8. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-2 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Rio de Janeiro..... | 72 |
| Figura 4.9. Balanço térmico anual para Florianópolis | 73 |
| Figura 4.10. Balanço térmico anual para Curitiba..... | 74 |
| Figura 4.11. Consumos dos modelos 1, 2, 3 e 4 de acordo com a envoltória..... | 76 |
| Figura 4.12. Consumos de acordo com a área de pavimento da edificação e envoltória | 77 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.13. Consumos de acordo com a densidade de carga interna baixa..... | 78 |
| Figura 4.14. Consumos de acordo com a densidade de carga interna média..... | 79 |
| Figura 4.15. Consumos de acordo com a densidade de carga interna alta | 79 |
| Figura 4.16. Consumos em cargas térmicas internas muito altas..... | 81 |
| Figura 4.17. Consumos de acordo com a absorvância das paredes externas. | 82 |
| Figura 4.18. Consumos de acordo com o arquivo climático. | 83 |
| Figura 4.19. Consumos de acordo com o funcionamento do sistema de condicionamento de ar. | 84 |
| Figura A.1. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Ashrae ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Florianópolis | 95 |
| Figura A.2. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Ashrae ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Curitiba..... | 95 |
| Figura A.3. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-1 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Florianópolis | 96 |
| Figura A.4. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-1 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Curitiba..... | 96 |
| Figura A.5. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-2 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Florianópolis | 97 |
| Figura A.6. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-2 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Curitiba..... | 97 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1.1 Produção e Consumo de Eletricidade no Brasil. | 23 |
| Tabela 1.2 Consumo de energia elétrica pelos setores comercial e residencial. | 24 |
| Tabela 2.1 Requisitos construtivos da ASHRAE <i>Standard</i> 90.1 - 2013 para a envoltória e por zona climática. | 38 |
| Tabela 3.1 Dados dos dias de projeto adotados para cada clima. | 54 |
| Tabela 3.2 Variações de área de pavimento. | 57 |
| Tabela 3.3 Variações nos componentes da envoltória. | 58 |
| Tabela 3.4 Equivalência da variação da densidade de ocupação. | 59 |
| Tabela 3.5 Variação da densidade de carga térmica interna. | 59 |
| Tabela 4.1 Principais dados de temperatura dos arquivos climáticos ... | 65 |
| Tabela 4.2 Somatório de graus-hora de resfriamento por clima. | 65 |
| Tabela 4.3 Consumos anuais do modelo de referência de acordo com a envoltória. | 67 |
| Tabela 4.4 Horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar | 69 |
| Tabela 4.5 Consumos de acordo com a envoltória, densidade de carga interna e clima | 80 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASHRAE | <i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers</i> |
| BEN | Balanco Energético Nacional |
| COP | <i>Coefficient of performance</i> ou coeficiente de desempenho |
| DOE | <i>Department of Energy</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| LEED | <i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> |
| RTQ-C | Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos |
| RTQ-R | Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica |
| TBS | Temperatura de bulbo seco |
| TBU | Temperatura de bulbo úmido |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| INTRODUÇÃO..... | 23 |
| 1.1 Justificativa | 23 |
| 1.2 Objetivos | 26 |
| 1.2.1 Objetivo Geral..... | 26 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos..... | 26 |
| 1.3 Estrutura do trabalho | 27 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 29 |
| 2.1 Eficiência energética em edificações | 29 |
| 2.2 Consumo em edificações comerciais | 39 |
| 2.3 Considerações finais..... | 47 |
| MÉTODO | 49 |
| 3.1 Definição do modelo de referência | 49 |
| 3.1.1 Geometria..... | 49 |
| 3.1.2 Cargas térmicas internas e externas | 51 |
| 3.1.3 Sistema de condicionamento de ar..... | 53 |
| 3.1.4 Envoltória..... | 55 |
| 3.2 Variações do modelo de referência | 57 |
| 3.2.1 Área de pavimento | 57 |
| 3.2.2 Envoltória..... | 58 |
| 3.2.3 Densidade de carga interna | 58 |
| 3.3 Arquivos climáticos..... | 59 |
| 3.4 Avaliação do modelo de referência | 60 |
| 3.5 Análises de sensibilidade | 62 |
| RESULTADOS | 63 |
| 4.1 Análise dos arquivos climáticos | 63 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1.1 | Temperatura e umidade relativa | 63 |
| 4.1.2 | Graus-hora de resfriamento | 65 |
| 4.2 | Avaliação do modelo de referência..... | 67 |
| 4.2.1 | Consumos de energia elétrica | 67 |
| 4.2.2 | Horas não atendidas..... | 69 |
| 4.3 | Análise dos ganhos de calor..... | 69 |
| 4.4 | Análise das variações do modelo de referência | 75 |
| 4.4.1 | Área de pavimento..... | 76 |
| 4.4.2 | Densidade de carga interna..... | 78 |
| 4.5 | Análise de sensibilidade..... | 81 |
| 4.5.1 | Densidade de carga térmica interna muito alta.... | 81 |
| 4.5.2 | Absortância solar de paredes externas | 82 |
| 4.5.3 | Diferentes arquivos climáticos | 82 |
| 4.5.4 | Funcionamento do sistema de condicionamento de ar | 83 |
| | CONCLUSÕES..... | 85 |
| 5.1 | Conclusões | 85 |
| 5.2 | Limitações..... | 86 |
| 5.3 | Sugestões para trabalhos futuros..... | 87 |
| | REFERÊNCIAS | 89 |
| | APÊNDICE A – ANÁLISES DE GANHOS E PERDAS DE CALOR..... | 95 |

INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Através do rápido avanço tecnológico do último século, a energia elétrica tornou-se essencial. A questão energética é de fundamental importância para os governos, a economia e a população de um país. O consumo crescente de energia no mundo levanta preocupações sobre as dificuldades de abastecimento, esgotamento dos recursos energéticos e impactos ambientais.

Para acompanhar o crescimento da demanda de energia, uma das soluções é gerar mais energia, de maneira eficiente e ambientalmente correta. Outra medida eficiente consiste em diminuir o consumo de energia, no Brasil e no mundo, evitando assim a degradação acelerada dos recursos naturais. Dentre os possíveis cenários causados pela falta de planejamento no setor energético, têm-se: falta de energia elétrica em horários de pico, racionamentos e até a paralisação econômica do país.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), o consumo de eletricidade no Brasil aumentou gradualmente nos últimos dez anos. Em 2013, o consumo total de energia elétrica no Brasil somou 516 TWh, representando um aumento de 43% em relação ao consumo de 2004, que foi de aproximadamente 360 TWh, como demonstrado na Tabela 1.1 (Ministério de Minas e Energia, 2014).

Tabela 1.1 Produção e Consumo de Eletricidade no Brasil.

| Ano | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Produção (TWh) | 387,5 | 403,0 | 419,4 | 445,1 | 463,1 | 466,2 | 515,8 | 531,8 | 552,5 | 570,0 |
| Consumo Total (TWh) | 359,9 | 375,2 | 390,0 | 412,1 | 428,3 | 426,0 | 464,7 | 481,0 | 498,4 | 516,3 |

Fonte: BEN (2014).

Para manter o fornecimento de energia elétrica brasileiro, especialmente nos últimos anos, foram reativadas diversas termoeletricas. De acordo com dados do Balanço Energético Nacional, as termoeletricas foram responsáveis por aproximadamente 20% da energia elétrica produzida em 2013. Por gerarem energia elétrica a partir da queima de combustíveis (carvão, petróleo ou gás natural), é aconselhável evitar a utilização de termoeletricas, pois além de caras também são muito poluentes. Em 2013, segundo o BEN, a oferta interna de energia no Brasil dividiu-se em 41% relacionados a fontes renováveis

(principalmente hidráulica, biomassa da cana e carvão vegetal) e 59% provenientes de fontes não renováveis como petróleo, gás natural, carvão mineral e urânio (Ministério de Minas e Energia, 2014).

O crescimento da população brasileira foi substancial nas últimas décadas. Em 1980, a população brasileira somava 119 milhões de habitantes. Em 2013, a população brasileira, de aproximadamente 202 milhões (IBGE, 2014), apresentou um consumo de energia elétrica per capita de 2.557 kWh/ano. O consumo de energia elétrica pelo setor comercial aumentou de aproximadamente 65 TWh em 2009 para quase 84 TWh em 2013, caracterizando um aumento de 29% em quatro anos. Através do estudo da composição do consumo de energia elétrica de residências distribuídas em dezessete estados brasileiros, Ghisi *et al.* (2007) observaram que o consumo de energia elétrica com condicionamento de ar aumentou progressivamente, podendo se tornar uma grande preocupação nos anos subsequentes, especialmente nas estações quentes. Como previsto, o setor residencial também registrou forte crescimento no consumo de energia elétrica, passando de aproximadamente 101 TWh em 2009 para 125 TWh em 2013, o que representa um aumento de 25% no mesmo período (Ministério de Minas e Energia, 2014). A Tabela 1.2, a seguir, expõe os valores de consumo de eletricidade pelos setores comercial e residencial brasileiros, de 2009 a 2013.

Tabela 1.2 Consumo de energia elétrica pelos setores comercial e residencial.

| Consumo (TWh) | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Residencial | 100,78 | 107,21 | 111,97 | 117,65 | 124,90 |
| Comercial | 65,25 | 69,17 | 73,48 | 79,23 | 83,70 |

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2014).

Visando garantir um futuro energeticamente sustentável, é necessário adotar determinadas políticas, como por exemplo: transformar os mercados consumidores, incentivar políticas energéticas estáveis, fornecer financiamentos para tecnologias eficientes, estabelecer acordos entre o governo e o setor privado, elaborar regulamentos e normas visando uma maior eficiência energética em edificações (GELLER, 2003).

Estudos apontam as edificações comerciais como responsáveis por uma consistente parcela do consumo de energia elétrica. O consumo

de energia elétrica em edificações depende de uma série de variáveis. Cada edificação pode ser consideravelmente diferente em seu projeto arquitetônico, nos materiais utilizados em sua construção, nas condições de uso, nos sistemas de condicionamento de ar. O consumo de energia elétrica também depende da região onde a edificação está localizada, porque as cargas térmicas externas estão relacionadas com o clima. Pelos parâmetros envolvidos, é possível perceber a complexidade que a análise do consumo de uma edificação implica.

A eficiência energética é importante neste contexto, pois possibilita reduzir o consumo de energia elétrica das edificações. De maneira geral, a eficiência energética em edificações visa à diminuição dos custos e a eliminação de desperdícios, sem abdicar da qualidade e conforto. Através da diminuição do consumo de energia elétrica em edificações, ameniza-se a necessidade do aumento de geração de energia elétrica. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2014), a eficiência energética é o mais importante "combustível do futuro".

Na área da construção civil, as linhas de pesquisa de desempenho térmico dos elementos construtivos, de conforto térmico do usuário e de eficiência energética em edificações trabalham na busca de soluções mais inteligentes e funcionais. O desenvolvimento de regulamentos e normas visando maior implementação da eficiência energética, através de recomendações e medidas de redução de consumo de energia elétrica em edificações, deve ser considerado prioritário para o futuro sócio-econômico dos países. Neste contexto, está inserido o objetivo da ASHRAE *Standard* 90.1, norma norte-americana que visa estabelecer requisitos mínimos de eficiência energética em edificações comerciais, tanto em fase de projeto quanto em operação.

A ASHRAE *Standard* 90.1 propõe-se a ser uma norma internacional, englobando diversos climas ao redor do mundo, além dos norte-americanos. Para cada zona climática, a norma estabelece requisitos relacionados à envoltória da edificação. A primeira versão da ASHRAE *Standard* 90.1 foi publicada em 1975. Desde então, os requisitos exigidos nas versões de 2007, 2010 e 2013 definem uma edificação com envoltória gradualmente mais isolada termicamente e menos influenciada pelas cargas térmicas externas. Em contrapartida, de acordo com o clima e a densidade de carga interna da edificação, a recomendação de usar isolamento na envoltória pode não ser a mais eficiente do ponto de vista energético. A ASHRAE *Standard* 90.1 é utilizada também por programas de certificação, como o LEED.

Inclusive, diferentes sistemas de certificação LEED fazem referência a diferentes versões da ASHRAE *Standard* 90.1.

A análise das normas existentes pode contribuir para o avanço da eficiência energética dentro do setor da construção civil no Brasil (onde há predomínio de climas quentes) impulsionando uma nova mentalidade relativa a edificações. Desta forma, este trabalho visa contribuir para a busca da redução do consumo de energia elétrica em edificações, por meio da análise das recomendações da envoltória de acordo com a ASHRAE *Standard* 90.1 em edificações comerciais. Para a realização do trabalho, foi analisada a influência de parâmetros construtivos da envoltória, climáticos e de densidade de carga térmica interna no consumo de energia elétrica de edificações comerciais em três climas brasileiros.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar as recomendações da ASHRAE *Standard* 90.1 - 2013 referentes à envoltória de edificações comerciais, adotando três climas brasileiros.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- Analisar a influência de parâmetros construtivos da envoltória no consumo de energia elétrica de edificações comerciais;
- Analisar a influência de variações na área de pavimento e de densidade de carga térmica interna no consumo de energia elétrica de edificações comerciais;
- Analisar a influência do clima no consumo de energia elétrica de edificações comerciais;
- Analisar os ganhos e perdas de calor, por meio da realização do balanço térmico em zonas térmicas da edificação.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema a ser estudado, o contexto que motivou o trabalho e os objetivos a serem alcançados.

A revisão de literatura está disposta no segundo capítulo, abordando a eficiência energética em edificações, simulação computacional e parâmetros que influenciam o consumo de energia elétrica de edificações comerciais.

O terceiro capítulo apresenta o método para o desenvolvimento do trabalho, utilizado para analisar as recomendações da ASHRAE *Standard* 90.1 - 2013, referentes à envoltória de edificações comerciais. No método está detalhado o modelo de referência, as variações definidas para o modelo de referência, os climas adotados, a análise de ganhos de calor (balanço térmico) e as análises de sensibilidade relativas a determinados parâmetros.

Os resultados obtidos a partir de simulações estão apresentados no quarto capítulo, organizados de acordo com o método proposto. As análises foram elaboradas majoritariamente através dos consumos de energia elétrica e dos balanços térmicos realizados.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, as limitações encontradas durante a elaboração do estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão dos assuntos relacionados à elaboração deste trabalho. Para isso, divide-se o capítulo em três partes principais: normas de eficiência energética; consumo de edificações comerciais e considerações finais.

2.1 Eficiência energética em edificações

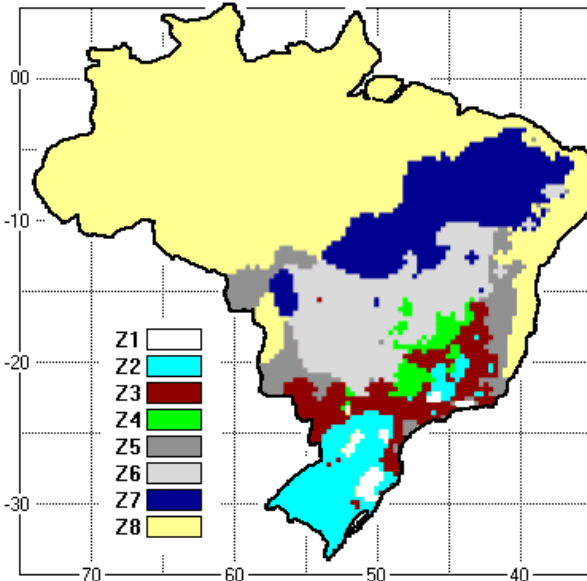
Devido ao acentuado aumento no consumo de energia elétrica, nas últimas décadas no Brasil, julgou-se importante estabelecer normas e regulamentações relacionadas à eficiência energética de edificações. Durante a década de 80, pesquisas voltadas ao desempenho térmico e energético de edificações começaram a ser desenvolvidas no país.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) é um programa do governo, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobras. O PROCEL foi instituído em 30 de dezembro de 1985 para promover o uso eficiente da energia elétrica e é responsável por promover ações de eficiência energética em diversos segmentos da economia, gerando benefícios para toda a sociedade. Dentre as áreas de atuação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica podem-se englobar os equipamentos, as edificações, a iluminação pública, poder público, indústria, comércio e conhecimento (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).

A crise energética ocorrida no Brasil em 2001 contribuiu para a promulgação da Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001, que trata sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (BRASIL, 2001a). Posteriormente, a mesma lei foi complementada pelo Decreto nº 4.059 de 19 de dezembro de 2001, que define níveis mínimos de eficiência energética e máximos de consumo específico, tanto de aparelhos e máquinas que funcionam consumindo energia elétrica, quanto de edificações construídas (BRASIL, 2001b). Esta iniciativa alavancou outros programas e regulamentos, como por exemplo, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações. O PROCEL EDIFICA foi instituído em 2003, com o objetivo de promover o uso racional de energia elétrica e de incentivar a conservação dos recursos naturais nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente. O programa atua em conjunto com o Ministério de Minas e Energia, o Ministério das Cidades, o setor de Construção Civil, centros de pesquisa, universidades e outras entidades de áreas relacionadas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).

Em 2005, foi publicada a NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações, sendo composta por cinco partes (ABNT, 2005). A NBR 15220 define um zoneamento bioclimático brasileiro, descreve os métodos de cálculo das propriedades térmicas dos componentes construtivos das edificações e indica diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Desde 2005, segundo a norma NBR 15220 - Parte 3, o território brasileiro é dividido em oito zonas bioclimáticas (ABNT, 2005). Estas zonas têm relação com as características climáticas das diversas regiões do território nacional, não obedecendo ao mapeamento político ou a regiões econômicas. A Figura 2.1 ilustra o zoneamento bioclimático brasileiro, estabelecido em 2005, pela norma NBR 15220 - Parte 3 (ABNT, 2005).

Figura 2.1. Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: Programa ZBBR, 2014.

A divisão do território brasileiro em zonas bioclimáticas baseou-se na homogeneidade quanto ao clima. Para isso, foram considerados três dados meteorológicos: as médias mensais das temperaturas máximas, as médias mensais das temperaturas mínimas, e as médias

mensais da umidade relativa do ar. Os arquivos climáticos de cada cidade apresentam os dados citados, hora a hora, para os 365 dias do ano. O zoneamento bioclimático define recomendações construtivas para que as edificações apresentem um melhor desempenho térmico, o que ocorre quando estão construídas de modo adequado para o clima local. Uma vez que a edificação proporciona melhor conforto térmico em seu interior, utilizando o clima em seu favor, isto reflete em economia de energia para o usuário da edificação. Utilizando o mapeamento bioclimático pode-se obter o clima de cada cidade e relacioná-lo, por meio de tabelas que indicam as estratégias e diretrizes construtivas bioclimáticas recomendadas para cada local, onde será projetada e construída uma edificação.

Para melhorar a qualidade das edificações residenciais brasileiras foi publicada a norma NBR 15575 sob o título de Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2008). Após anos de revisões e consultas públicas, a norma entrou em vigor em Julho de 2013, estabelecendo requisitos mínimos de desempenho, vida útil e de garantia para os diversos sistemas que compõem as edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares. A NBR 15575 (ABNT, 2013) representa um avanço para o setor da construção civil no Brasil, caracterizando um passo importante para a qualidade das edificações residenciais e seu desempenho nas diversas vertentes analisadas pela norma. Relacionada à simulação termo-energética, a NBR 15575 tem seu principal foco nos requisitos mínimos de desempenho térmico da edificação e em outros fatores relacionados a cada zona bioclimática.

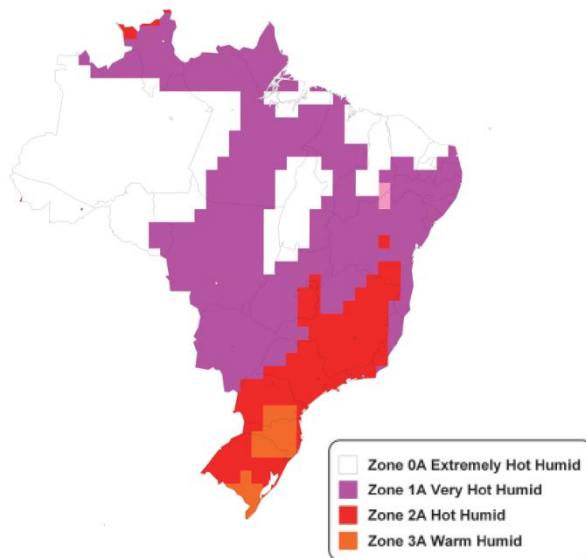
O PROCEL-EDIFICA, por sua vez, originou dois regulamentos de eficiência energética: o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R). No Brasil, a metodologia para a classificação do nível de eficiência energética de edificações comerciais foi publicada em 2009, revisada nos anos seguintes e continua sofrendo modificações desde então. Ambos os regulamentos avaliam as edificações em cinco níveis: desde A (mais eficiente) até E (menos eficiente). O RTQ-C aplica-se a edifícios condicionados, parcialmente condicionados ou não condicionados e especifica requisitos técnicos e métodos para a classificação de edifícios comerciais, de serviços e públicos. O RTQ-C avalia a edificação com base principalmente na envoltória, nos sistemas de iluminação e no sistema de condicionamento de ar. O método presente no regulamento

adota um processo de avaliação e etiquetagem, declarando quão eficiente é o edifício analisado. Pode-se avaliar um projeto pelo método prescritivo que utiliza determinados critérios e equações ou pelo método de simulação (INMETRO, 2012).

A preocupação com a questão energética não é exclusivamente brasileira, pelo contrário, muitos países possuem suas próprias normas e regulamentos relacionados à eficiência energética em edificações. Dentre as mais respeitadas e utilizadas no mundo, destacam-se as normas norte-americanas.

Em 1975, a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) implantou a sua primeira norma de eficiência energética para projetos e construções de novas edificações, a *ASHRAE Standard 90* (ASHRAE, 1975). Em 1989, a ASHRAE implantou a *Standard 90.1* que considera a envoltória da edificação, sistemas de condicionamento de ar, iluminação artificial e aquecimento de água incluindo motores e equipamentos. A *ASHRAE Standard 90.1 (Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings)* é uma norma norte-americana que apresenta os requisitos mínimos para projetos de eficiência energética para edificações (comerciais e residenciais), exceto para edifícios residenciais de poucos pavimentos.

Desde então, a *ASHRAE Standard 90.1* passou por diversas revisões. Em 1999, o Conselho de Administração da ASHRAE votou em estabelecer o padrão de manutenção contínua, com base em mudanças rápidas na tecnologia de energia e os preços da energia. A norma foi atualizada em 2004, 2007, 2010, e 2013 para refletir as tecnologias mais novas e mais eficientes. A versão mais atual desta norma possui novas características e mudanças propostas pelo público, como a nova formatação da norma para facilidade de uso. Outra norma importante é a *ASHRAE Standard 169 (Climatic Data for Building Design Standards)*, que dispõe sobre dados climáticos para normas de projeto de edificações. A *ASHRAE Standard 169 - 2013* realiza a separação do território brasileiro em zonas climáticas, de acordo com a Figura 2.2.

Figura 2.2. Zoneamento climático brasileiro segundo a ASHRAE *Standard* 169

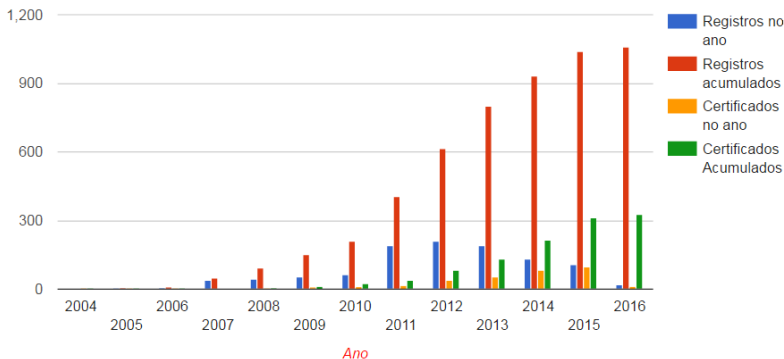
Fonte: ASHRAE *Standard* 169, 2013.

A elaboração de projetos e técnicas de construção para as edificações podem minimizar a densidade de carga interna e otimizar seus equipamentos, chegando desta forma a economias de até 40% sobre o total de consumo de energia elétrica, em comparação ao consumo de edificações convencionais. O processo para alcançar economia de energia não precisa estar somente atrelado a sistemas de condicionamento de ar inovadores. Ao invés disso, a economia deve ser proveniente, quando possível, da minimização das cargas de aquecimento e resfriamento, que são processadas pelo sistema de condicionamento de ar (TODESCO, 1996).

A política energética norte-americana está cada vez mais centrada em avaliar a eficiência das edificações. O *Energy Star* é um exemplo desta política, sendo um programa, que entre outros objetivos, avalia o uso de energia na edificação, considerando a operação e a carga interna da edificação, uma vez que o consumo de energia pode variar bastante de acordo com a utilização do proprietário. O LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) é um programa de certificação de edificações que reconhece as melhores estratégias e práticas de construção. A certificação LEED consiste em um selo verde para

edificações, de acordo com padrões internacionais de sustentabilidade. Para receber a certificação LEED, a edificação precisa satisfazer alguns pré-requisitos e através de pontos pode alcançar diferentes níveis de certificação. No Brasil, do total de edificações registradas pelo LEED, aproximadamente 54% estão localizadas no estado de São Paulo. A emissão do selo LEED é realizada pela *Green Building Council*, tendo iniciado mundialmente em 2000 e no Brasil no ano de 2007. Existem mais de mil registros e aproximadamente trezentas certificações LEED no Brasil, como ilustrado na Figura 2.2 abaixo (GBC Brasil, 2016).

Figura 2.3. Registros e certificações LEED no Brasil.



Fonte: GBC Brasil, 2016.

Newsham *et al.* (2009) analisaram dados de consumo de energia, medidos a partir de cem edificações certificadas pelo LEED. O estudo permitiu concluir que, em média, os edifícios LEED consomem de 18% a 39% menos energia por unidade de área quando comparados às edificações convencionais. Em contra partida, aproximadamente 30% dos edifícios com certificação LEED consomem mais energia do que as edificações convencionais. Edificações eficientes contribuem para o desenvolvimento da sociedade através de economias de energia substanciais, porém, deve-se analisar com maior cuidado a classificação atribuída às edificações através de programas de certificação.

Scofield (2013) analisou a eficácia da certificação LEED na redução de consumo de energia e emissões de gás em grandes edificações de escritórios em Nova York. Os dados de *benchmark* de energia consumida por edificações de Nova York mostram que os escritórios com certificação LEED *Gold* apresentam cerca de 20%

menor consumo de energia e emissões quando comparados aos outros edifícios de escritório de Nova York. Porém, economias semelhantes não são encontradas para edifícios com certificação LEED *Silver* ou inferior. Conclui-se que estes edifícios consomem mais energia e apresentam emissões de gás relativamente maiores do que outros edifícios de escritório de Nova York. Em contrapartida, de acordo com o índice EPR (*Energy Performance Rating*), a certificação LEED sempre resultou em edifícios mais eficientes. Estes resultados levantam dúvidas significativas quanto ao uso do *Energy Star* EPR como avaliação energética para edifícios com certificação LEED.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) participa dos processos de desenvolvimento de modelos de códigos de energia para edificações, administrados pela ASHRAE e pelo *International Code Council* (ICC). As atividades realizadas pelo DOE incluem o desenvolvimento e apresentação de propostas de alteração do código, a realização de análise de eficiência energética e redução de custos nas edificações, e formulação de metodologias de avaliação subjacentes.

Atualmente, a ASHRAE possui oito projetos ativos englobando a conservação de energia. Um destes projetos foi nomeado de "Desenvolvimento de metas energéticas máximas e tecnicamente exequíveis para edificações comerciais". Este projeto, por meio da modelagem termo-energética do prédio, espera encontrar o menor consumo de energia previsto para uma variedade de tipologias de edificações comuns. O objetivo do projeto é definir, para cada tipologia, as metas de consumo de energia, tão baixas quanto possíveis, agora e no futuro próximo. Outro objetivo do projeto é entender os limites tecnológicos da eficiência energética em edificações. Para determinadas tipologias de edificações comerciais como escolas, por exemplo, é possível alcançar o "*net-zero building*", em determinados climas, através da inclusão de fontes renováveis de energia no local da edificação. O termo edificação de energia zero é usado para definir edificações nas quais a quantidade total de energia consumida em uma base anual é aproximadamente igual à quantidade de energia renovável gerada no local. Para outras tipologias de edificação, tais como supermercados e hospitais, esta meta não é viável com a tecnologia existente, a menos que sejam utilizadas grandes quantidades de energia, também provenientes de fontes renováveis no local onde está a edificação. Incluindo o alto custo das fontes energéticas e as restrições de cada região, que muitas vezes limitam a sua utilização, a melhor estratégia

pode ser a de reduzir o uso de energia antes de avaliar a inclusão de fontes renováveis de energia no local.

Além de normas e regulamentos, as pesquisas em eficiência energética também englobam o mapeamento e caracterização das edificações existentes. Através de levantamentos e estudos, é possível catalogar as características predominantes da envoltória, das rotinas e da carga interna de cada tipologia de edificação, seja ela comercial ou residencial. Utilizando os bancos de dados resultantes e conhecimentos na área de simulação computacional, é possível representar cada tipologia de edificação através do desenvolvimento de modelos de referência.

Como parte do apoio do Departamento de Energia dos Estados Unidos na norma ASHRAE *Standard 90.1*, pesquisadores do *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) definiram um conjunto de protótipos de edifícios que cobrem 80% da área útil comercial dos Estados Unidos, incluindo edifícios comerciais e residenciais em todas as zonas climáticas dos Estados Unidos (DOE, 2014). Estes protótipos de edifícios comerciais cobrem todos os tipos de construções comerciais (com exceção dos supermercados) nos Estados Unidos. Os protótipos incluem 15 tipos de edifícios comerciais para 17 cidades americanas (englobando todas as oito zonas climáticas dos Estados Unidos). Além das quinze tipologias comerciais, também foi desenvolvida uma tipologia residencial multifamiliar. A combinação atual resulta em um conjunto total de 1.088 modelos de edificações, disponibilizados para o programa de simulação *EnergyPlus*. O *EnergyPlus* é um programa computacional de análise termo-energética, criado a partir dos programas *BLAST* e *DOE-2*, distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e de seus sistemas, dentre outras finalidades (DOE, 2014).

O conjunto de quinze tipologias comerciais representa 3.279 edificações (de um total de 5.215) do banco de dados do *Commercial Buildings Energy Consumption Survey* (CBECS). Este subconjunto representa 4,1 bilhões de metros quadrados, valor equivalente a 62% da área construída e 65% do total de consumo de energia das edificações norte-americanas. As edificações restantes do banco de dados do CBECS compreendem edificações que variam consideravelmente em tamanho, carga interna e operação. Apesar disso, as edificações restantes

possuem similaridades com pelo menos uma das quinze tipologias comerciais estabelecidas.

O programa de Tecnologia em Edificações do Departamento de Energia dos Estados Unidos possui objetivos consistentes para a eficiência energética em edificações. Este programa requer a colaboração entre os laboratórios do Departamento de Energia dos Estados Unidos e a indústria de construção civil. O propósito do programa é desenvolver modelos de referência para as tipologias de edificações comerciais mais comuns, a fim de servir como ponto de partida para pesquisas relacionadas à eficiência energética. Estes modelos representam características realistas de edificações e práticas de construção norte-americanas.

O objetivo dos modelos é representar as edificações norte-americanas novas e também as já existentes. Os modelos de referência de edificações comerciais são usados pelo DOE em pesquisas, visando avaliar novas tecnologias, otimizar projetos, desenvolver novas normas (inclusive novas versões da *ASHRAE Standard 90.1*) e regulamentos, dentre outros estudos.

As zonas climáticas são numeradas de 1 a 8 e possuem letras subsequentes (A, B ou C) relacionadas à umidade da respectiva zona. As cidades americanas escolhidas pelo programa representam porções significativas do total de edificações e de todas as zonas climáticas dos Estados Unidos. Aproximadamente 78% da população norte-americana está localizada em cinco das quinze zonas climáticas estabelecidas pela *ASHRAE Standard 169* (2013). Para representar todas as zonas climáticas e as maiores densidades populacionais, foram escolhidas as cidades mais populosas de cada zona.

Existem três versões de modelos de referência para cada tipologia: a nova, a pós 1980 e a anterior a 1980. As três versões têm a mesma geometria, área e rotinas de operação. As diferenças entre versões consistem nos valores de isolamento, nos níveis de iluminação, nos tipos e eficiências do sistema de condicionamento de ar. A versão nova dos modelos de referência atende aos requisitos mínimos da norma *ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2004*. A versão pós 1980 atinge os níveis mínimos da *ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1989*. Por último, os modelos da versão anterior a 1980 foram montados a partir de um conjunto de requisitos de normas anteriores e estudos relacionados às práticas de construção da época. Na Tabela 1.2 encontram-se os valores de transmitância térmica máxima do elemento construtivo e a

resistência térmica mínima do isolante a ser inserido no mesmo, para cada zona climática, de acordo com a ASHRAE *Standard 90.1 - 2013*.

Tabela 2.1 Requisitos construtivos da ASHRAE *Standard 90.1 - 2013* para a envoltória e por zona climática.

| Requisitos | Transmitância térmica máxima [W/(m ² .K)] | | | Resistência térmica mínima do isolante [(m ² .k)/W] | | |
|-----------------|---|--------|----------|---|---------------|-----------|
| | 1(A,B,C) | 2(A,B) | 3(A,B,C) | 1(A,B,C) | 2(A,B) | 3(A,B,C) |
| Zona climática | 1(A,B,C) | 2(A,B) | 3(A,B,C) | 1(A,B,C) | 2(A,B) | 3(A,B,C) |
| Cobertura | 0,273 | 0,220 | 0,220 | 3,5 | 4,4 | 3,5 |
| Paredes pesadas | 3,293 | 0,857 | 0,701 | - | 1,0 | - |
| Paredes leves | 0,705 | 0,479 | 0,435 | 2,3 | 2,3+0,7 i.c.* | 2,3 |
| Piso | 1,825 | 0,606 | 0,420 | - | 1,9 | 1,8 i.c.* |
| Janela | 3,690 | 3,690 | 3,41 | - | - | - |

*i.c = isolante contínuo

Fonte: ASHRAE Standard 90.1, 2013.

O termo "paredes leves" da Tabela 3.2 foi adaptado da ASHRAE *Standard 90.1-2013*, na qual está descrito como parede de uma edificação com estrutura metálica (*steel frame*). As cargas internas (equipamentos, pessoas e iluminação) de todos os protótipos de edificações comerciais estão definidas de acordo com os respectivos requisitos da ASHRAE *Standard 90.1 - 2013* (DOE, 2014).

Em suma, os modelos de referência de edificações representam as tipologias mais comuns e são desenvolvidos com o objetivo de servir como ponto de partida para pesquisas relacionadas à eficiência energética. Dentre os modelos de referência estabelecidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos estão os escritórios, modelados de acordo com suas dimensões: pequenos, médios e grandes. O protótipo de escritório pequeno (*small office*) consiste em uma edificação de um pavimento com aberturas nas quatro fachadas. O percentual de aberturas nas fachadas é de aproximadamente 21% e a edificação possui 27,68 metros de comprimento por 18,44 metros de largura. O protótipo de escritório médio (*medium office*) possui três pavimentos com aberturas nas quatro fachadas e apresenta percentual de aberturas de 33%, igual nas quatro fachadas. A edificação possui as seguintes dimensões: 49,91 m por 33,27 m, resultando em uma área total de 4.980 m². Para finalizar, o protótipo de escritório grande (*large*

office) engloba um total de doze pavimentos, além de um pavimento no subsolo, onde está localizado o centro de processamento de dados da edificação. O percentual de aberturas nas fachadas é de 38%. A edificação possui 73,11 m de comprimento e 48,74 m de largura, totalizando 46.320 m² de área (NREL, 2014).

2.2 Consumo em edificações comerciais

Melo (2007) apresenta uma análise do desempenho energético de edificações comerciais. O principal objetivo do trabalho consistiu em analisar a influência da transmitância e capacidade térmica das superfícies opacas em edificações comerciais para diferentes condições de carga interna. Foram elaborados modelos com diferentes densidades de carga interna, absorvância solar externa, padrão de uso e razão de área de janelas nas fachadas. Para a realização do estudo, foram estabelecidas duas tipologias: a primeira tipologia representa um edifício de cinco pavimentos e a segunda tipologia representa uma loja comercial de um pavimento. Três climas foram adotados para realizar as simulações: Florianópolis, Curitiba e São Luís. Na análise dos resultados, observou-se que o aumento da transmitância térmica das paredes da primeira tipologia, para todos os climas analisados, proporcionou uma redução do consumo anual da edificação, principalmente para os casos simulados em conjunto com alta densidade de carga interna ou alto padrão de uso e com baixa absorvância solar externa. Nos resultados referentes à segunda tipologia, o aumento da transmitância térmica da cobertura representou um aumento do consumo anual da edificação para todos os casos simulados nos três climas adotados. Os resultados encontrados para os valores de transmitância térmica contestam os limites adotados pela ASHRAE *Standard 90.1* - 2004, visto que para os três climas analisados, a utilização de uma parede com alto valor de transmitância térmica facilitou a dissipação dos ganhos internos de calor para o ambiente externo e reduziu o consumo do sistema de condicionamento de ar.

Chvatal (2007) estudou a relação entre aumento de isolamento térmico da envoltória de edificações e seu desempenho térmico. A pesquisa foi motivada pela exigência de envoltórias gradualmente mais isoladas, por parte dos regulamentos e diretivas européias relacionados ao desempenho energético de edificações. Foram realizadas simulações computacionais com o programa TRNSYS. Nas simulações variaram-se diversos parâmetros, dentre eles: espessura do isolamento, ventilação,

sombreamento, clima, absorvância e inércia térmica das paredes externas. Dentre as conclusões do estudo, constatou-se que em edificações comerciais condicionadas artificialmente, com alta densidade de carga interna, o isolamento térmico não proporciona economia de energia. Pelo contrário, em climas da Europa Meridional, a adoção de isolamento térmico na envoltória pode aumentar o consumo de energia elétrica destinado ao condicionamento de ar, especialmente se a edificação apresentar alta densidade de carga interna.

Utilizando o programa de simulação computacional *EnergyPlus*, Westphal e Lamberts (2007) elaboraram um método para servir como ferramenta de apoio na elaboração e melhor entendimento do modelo computacional da edificação. Foram definidas equações de regressão linear múltipla com o objetivo de prever o consumo de energia elétrica de edificações comerciais brasileiras. Os climas brasileiros adotados para serem utilizados nas simulações foram Curitiba, Florianópolis e Salvador. Após amostragem dos dados por Hipercubo Latino, reduziram-se os casos analisados, permitindo a obtenção de um coeficiente de determinação maior. Através da aplicação do método proposto para um estudo de caso, verificou-se que a eficiência do sistema de condicionamento de ar apresentou grande influência no desempenho energético da edificação. O método desenvolvido permitiu identificar os parâmetros mais importantes para a modelagem da edificação e fornece, ao simulador, o grau de imprecisão do modelo, de acordo com as incertezas existentes.

Carlo (2008) elaborou uma metodologia para avaliar a eficiência energética da envoltória de edificações comerciais e institucionais. Foram definidos cinco modelos de edificações, caracterizando três tipos de atividades: grandes e pequenos escritórios, grandes e pequenas lojas e hotéis. Foram observadas características em 1103 edificações distribuídas em cinco cidades brasileiras: Recife, Salvador, Belo Horizonte, São Paulo e Florianópolis. Dentre os parâmetros avaliados estão: área de janela, tipo de vidro, existência de proteções solares, proporção das menores fachadas em relação às maiores, número de pavimentos e forma da edificação. As características mais comuns encontradas para cada tipologia serviram à elaboração de modelos representativos para simulação computacional. Além destes modelos, alternativas contendo soluções mais eficientes também foram simuladas. Os objetivos do estudo foram alcançados ao apresentar equações de

regressão para avaliação da eficiência e indicadores de custos relacionados à eficiência da envoltória.

Pérez-Lombard *et al.* (2008) analisaram os dados disponíveis sobre consumo de energia nos edifícios comerciais e residenciais em diversos países. A contribuição global de edifícios no consumo de energia elétrica atinge valores entre 30% e 40% nos países desenvolvidos, e tem ultrapassado os setores industriais e de transporte. Os resultados do estudo demonstram que, em escala global, os sistemas de climatização são responsáveis por aproximadamente metade do consumo total de energia elétrica das edificações comerciais.

Em Bahrain, as autoridades governamentais relacionadas à água e eletricidade estabeleceram o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica e as emissões de dióxido de carbono em 40% através da utilização de normas referentes à envoltória das edificações. Radhi (2009) investigou a possibilidade de tal meta ser alcançada através das normas vigentes em Bahrain e avaliou o atual impacto das normas no consumo de energia elétrica das edificações. Por ser uma ilha localizada no Golfo Pérsico, Bahrain apresenta temperaturas altas ao longo do ano, podendo chegar acima dos 45°C durante o verão. O estudo foi realizado por meio de simulações computacionais no programa Visual DOE e seu principal foco são as edificações comerciais condicionadas artificialmente. Aplicando-se as normas vigentes para a envoltória, verificaram-se diminuições de até 25% no consumo de energia elétrica das edificações, através da adoção de vidros adequados e isolamento térmico. As emissões de dióxido de carbono também sofreram reduções, em torno de 7%. Sendo assim, as normas vigentes ainda necessitam evoluir para alcançar as reduções de 40% no consumo de energia elétrica e emissões de dióxido de carbono propostas pelo governo.

A envoltória das edificações comerciais exerce influência sobre o consumo de energia elétrica das mesmas. Tamanini (2013) avaliou edifícios de escritórios em Florianópolis para a elaboração de um modelo predominante na região para ser utilizado em análises energéticas. Foram realizadas, a partir de dados da Secretaria de Urbanismo e Serviços Públicos (SUSP), análises de características físicas, geométricas e geográficas, assim como a modelagem de maquetes eletrônicas que representassem o tipo predominante dessas edificações na cidade. O levantamento englobou trinta empreendimentos diferentes. Foi constatado que 57% das edificações possuíam mais de 50% de superfície envidraçada. A pesquisa indica que a orientação de maior percentual de área envidraçada esteve sempre relacionada à

fachada principal ou secundária e não ao impacto da radiação solar na fachada dos edifícios. O autor concluiu que há pouca preocupação de órgãos públicos e parte dos projetistas na concepção e análise da eficiência energética das edificações. A estética visual e o dimensionamento de espaços conforme padrões comerciais prevaleceram e foram os elementos determinantes do projeto de edifícios de escritórios em Florianópolis.

A avaliação de desempenho é um passo importante para aumentar a eficiência energética das edificações. Existem dois métodos para avaliar o desempenho de edificações já construídas: avaliação operacional baseada no uso real de energia elétrica ou classificação energética baseada no potencial de eficiência da edificação incluindo a envoltória, os equipamentos e os sistemas. A Comissão de Energia da Califórnia desenvolveu o BEARS (*Building Energy Asset Rating System*) para ser utilizado como peça chave na melhoria da eficiência energética de edificações comerciais já construídas no estado da Califórnia. A análise de sensibilidade realizada pelo estudo, envolvendo os diversos parâmetros (inseridos no programa de simulação) das edificações analisadas, ajudou a estabelecer as variáveis que influenciavam de maneira mais impactante no consumo de energia elétrica da edificação. Obtendo a magnitude de cada variável no consumo, foi possível definir as variáveis prioritárias, ou seja, aquelas cujos dados deveriam impreterivelmente ser coletados. Edifícios eficientes energeticamente possuem maior valor econômico, têm menor custo de operação e proporcionam melhor conforto térmico ao usuário. O desenvolvimento de métodos para avaliar a eficiência energética das edificações é uma tarefa desafiadora e promissora. Dentre os desafios que precisam ser vencidos, para o desenvolvimento de métodos com a finalidade de avaliar energeticamente uma edificação, destacam-se: o balanceamento entre o custo e a precisão de coleta dos dados; o estabelecimento de uma modelagem simplificada e robusta; a seleção de um modelo de aferição (*benchmark*) adequado e a apresentação da classificação de forma clara. Além disso, dois elementos são muito importantes para análise dos dados: a metodologia de modelagem e a categorização das tipologias adotadas para as edificações comerciais (CROWE *et al.*, 2012).

A criação de um banco de dados com valores de referência para o consumo de edificações comerciais de um país é um passo importante para entender o consumo de energia elétrica em edificações comerciais.

Borgstein e Lamberts (2014) propõem uma metodologia para o desenvolvimento de *benchmarks*, usando dados estatísticos e de auditoria energética como referência para relacionar os consumos finais de agências bancárias com os graus-hora de resfriamento do clima. Os graus-hora de resfriamento foram calculados a partir de uma temperatura de bulbo úmido de 15°C. Por meio da análise dos resultados, é possível perceber que há correlação entre o consumo com condicionamento de ar e os graus-hora de resfriamento do clima. A análise de regressão linear simples englobou 1890 agências bancárias brasileiras, localizadas em 57 climas diferentes. O trabalho pode servir como base para estudos envolvendo outras tipologias de edificações comerciais.

A escolha apropriada da envoltória das edificações é uma maneira eficiente de reduzir as cargas de aquecimento e resfriamento. O isolamento térmico é um ótimo recurso para minimizar as perdas e os ganhos de energia em edificações. A determinação do tipo e da espessura ideal de isolamento térmico utilizado na envoltória são os objetivos de diversos estudos de eficiência energética. O conceito de espessura ideal, do ponto de vista econômico, inclui o custo inicial do isolante e o valor de economia de energia elétrica obtida a partir dele. A espessura ideal de isolante é função da envoltória, forma, orientação, clima, eficiência do sistema de condicionamento de ar da edificação, dentre outros. A fim de estimar o consumo de energia elétrica necessária para aquecimento ou resfriamento, um método comumente utilizado é o somatório de graus-hora. O método de graus-hora consiste em um somatório da diferença entre as temperaturas externas e uma temperatura base estabelecida (KAYNAKLI, 2012).

O estudo de Corgnati *et al.* (2013) baseou-se na *Energy Performance of Buildings Directive 2010* e as respectivas exigências de eficiência energética em edificações para os países membros da União Europeia. Uma das exigências consiste em definir requisitos mínimos de desempenho energético de edifícios e componentes de construção para alcançar níveis ótimos de desempenho. Para alcançar um nível ótimo de desempenho, os países membros são obrigados a criar um conjunto de edifícios de referência, a nível nacional ou regional, para ser usado nos cálculos. Em particular, um método geral para a criação de edifícios de referência é ilustrado: um estudo de caso de um edifício de escritórios como edifício de referência para o parque imobiliário existente italiano. O processo relativo à definição e modelagem da edificação de referência

foi efetuado através do programa de simulação computacional *EnergyPlus*.

Boyano *et al.* (2013) apresentam os índices de uso de energia e exploram os potenciais de economia de energia nos edifícios de escritórios em toda a Europa, simulando diversos cenários atuais, através do programa *EnergyPlus*. Os climas utilizados para as simulações foram Tallinn, Madrid e Londres, buscando representar as três zonas climáticas em que a Europa está dividida. Independentemente do local do edifício de escritórios, a economia de energia foi alcançada, chegando a 46% do consumo total da edificação. A economia alcançada nos sistemas de aquecimento e resfriamento otimizados foi de 23% e 20%, respectivamente. Dois outros aspectos foram investigados neste trabalho: a melhoria do isolamento das janelas e das paredes externas e a orientação do edifício. Através da análise dos resultados, observou-se que os fatores de isolamento mais elevados são recomendados em zonas climáticas frias ou amenas. Para as zonas de clima mais quente, o isolamento deve ser cuidadosamente analisado, uma vez que os escritórios construídos em zonas de clima quente são submetidos a maiores ganhos de calor que não podem ser facilmente liberados se a envoltória da edificação for bem isolada. Consequentemente, a demanda de energia para o resfriamento seria maior, afetando o consumo total de energia e o desempenho energético da edificação.

O trabalho de Picco *et al.* (2014) analisa os benefícios da aplicação da análise energética no projeto de construção em fase inicial, para os grandes edifícios comerciais. A pesquisa destaca as barreiras que impedem esta integração inicial e propõe o desenvolvimento de uma metodologia adaptada em torno da otimização da eficiência energética durante a fase inicial de projeto da edificação. Além disso, a pesquisa buscou identificar a precisão obtida através de simplificações do modelo de edificação. Um grande edifício de escritórios, de seis pavimentos, foi o estudo de caso adotado. O modelo foi elaborado utilizando-se os programas *EnergyPlus* e *Openstudio*. O modelo detalhado é então analisado e depois é progressivamente simplificado. Em cada etapa progressiva de simplificação, a comparação com os resultados detalhados é dada em termos de necessidades energéticas e curvas de potência do sistema. As diferenças encontradas entre o modelo mais simplificado e o modelo detalhado de escritório foram de 15,6% para as cargas de aquecimento e de 14,6% para cargas de resfriamento.

Melo *et al.* (2014) compararam a avaliação de desempenho energético de edificações comerciais da ASHRAE *Standard* 90.1-2007 com o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Os modelos de edificação foram criados de acordo com as exigências de ambos (regulamento e norma). Foram realizadas simulações computacionais utilizando o programa *EnergyPlus* para avaliar a classificação energética de edificações comerciais e residenciais localizados em três cidades brasileiras: Brasília, Rio de Janeiro e Belém. Os autores concluíram que para os edifícios comerciais, há equivalência entre os níveis de A e C da regulamentação brasileira e o modelo de referência da ASHRAE 90.1-2007, dependendo do clima considerado. Uma das principais diferenças entre os modelos utilizados está relacionada com a transmitância térmica de paredes externas e cobertura, pois a ASHRAE 90.1-2007 exige maior isolamento nas edificações.

Para ocorrer transmissão de calor entre dois corpos é necessário que os mesmos apresentem temperaturas diferentes. Em edificações, o fluxo de calor tem dois possíveis sentidos: do exterior para o interior ou do interior para o exterior. O sentido do fluxo depende essencialmente da diferença entre temperatura interna e externa. Quanto maior a diferença entre as duas temperaturas, maior será a quantidade de energia térmica transferida. Durante o verão, o calor do ambiente externo migra para o interior das edificações, aumentando a carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar. Durante o inverno, o sentido da transferência de calor costuma ser invertido, fluindo do ambiente interno para o externo, exigindo uma maior utilização do sistema de calefação. As trocas de calor entre o ambiente interno e externo acontecem através da envoltória da edificação, composta por paredes, cobertura, piso e janelas.

Isolantes térmicos são elementos que restringem o fluxo de calor. Sendo assim, os isolantes térmicos apresentam uma baixa condutividade térmica quando comparados a outros materiais. Quando aplicado na envoltória, o efeito do isolamento vai depender de como e em que local da parede ou da cobertura este foi instalado. Ozel (2013) realizou pesquisas para determinar a espessura ideal de isolamento de acordo com as necessidades de resfriamento, para paredes de edificações em climas quentes. O estudo utilizou dados climáticos da cidade de Antalya, possuidora de um clima caracteristicamente mediterrâneo, na costa sudoeste da Turquia, onde predominam verões quentes e secos e

invernos amenos e chuvosos. Em um primeiro momento, foram calculados o atraso térmico e carga de resfriamento. Para possibilitar tais cálculos, utilizou-se um programa desenvolvido em Matlab especialmente para este caso. O programa utiliza um método de diferenças finitas implícitas, de acordo com condições periódicas, durante o período de verão, para as diferentes orientações das paredes da edificação. Os resultados obtidos também foram comparados com os métodos de graus-dia e graus-hora. A espessura ótima da camada de isolamento para cada orientação de parede foi determinada fazendo uma análise de custo, considerando um tempo de vida de vinte anos para a edificação. Obteve-se, como resultado, que a parede da fachada norte é a que necessita da menor espessura de isolamento, por possuir a menor carga de resfriamento dentre as diversas fachadas. A maior espessura de isolamento necessária foi indicada para as paredes externas das fachadas leste e oeste, pertencentes às zonas nas quais as cargas de resfriamento foram máximas.

Na Tailândia, devido ao clima quente e úmido, as edificações eram tradicionalmente construídas a partir de materiais leves, ou seja, praticamente sem ou com baixa inércia térmica. Anteriormente à introdução do condicionamento de ar em ambientes no país, os tijolos cerâmicos e o concreto começaram a substituir a tradicional madeira como principal material construtivo. Estas edificações novas, porém quase que totalmente vedadas, exigiam condicionamento de ar e ventilação forçada. Frente a esta problemática, Chirarattananon *et al.* (2012) realizaram simulações para verificar quanto a utilização de isolamento térmico na envoltória de três modelos de edificações comerciais reflete na diminuição do fluxo de calor externo para o interior dos ambientes condicionados. Os autores observaram que com o aumento progressivo da espessura do isolamento, ocorria diminuição gradual na carga térmica de resfriamento, a ser retirada pelo sistema de condicionamento de ar. Os pesquisadores concluem afirmando que as edificações na Tailândia não necessitam de isolamento mesmo sendo comprovado que o isolamento reduz o ganho de calor através da envoltória. No caso de aberturas nas paredes externas, o isolamento pode ser muito ineficaz por impedir que os ganhos de calor durante o dia (fluxo através da janela) sejam dissipados pela envoltória durante a noite.

Quando o objetivo é apresentar eficiência energética, as edificações devem ter projetos precisos e bem pensados, especialmente

com relação aos seus envelopes construtivos. Afinal, o que determina as trocas de calor entre o ambiente interno e o ambiente externo é o próprio envelope. O caso analisado por Sozer (2010) foi um hotel de alto padrão em Izmir, utilizando o programa computacional *e-QUEST* para efetuar as simulações. A cidade de Izmir está localizada no sudeste da Turquia e tem seu clima caracterizado por verões quentes e invernos frios. Um conceito conhecido a ser seguido, nestes casos, consiste em limitar as perdas de calor durante o inverno e bloquear os ganhos de calor pela edificação durante o verão. Esta pesquisa também estudou e comprovou que elementos de sombreamento e tipos específicos de vidro, utilizados nas janelas presentes na edificação, reduzem drasticamente o calor conduzido através do envelope. Analisando os resultados da simulação, a edificação proposta obteve uma economia de energia de 40% quando comparada à edificação real. Enfim, concluiu-se que através de um envelope adequado da edificação é possível alcançar altos níveis de eficiência energética, inclusive em construções de maior porte, como por exemplo, hotéis.

2.3 Considerações finais

Como mencionado anteriormente, os edifícios comerciais são grandes consumidores de energia elétrica. O consumo de escritórios pode ser subdividido entre a iluminação, os equipamentos e o sistema de condicionamento de ar. Em um cenário em que o consumo de energia elétrica continua crescendo no mundo, a eficiência energética em edificações torna-se gradualmente mais importante para os governos, para a economia e para a população dos países.

Normas e regulamentos internacionais, inclusive a ASHRAE *Standard* 90.1, criados para promover o uso eficiente da energia elétrica, recomendam a adoção de isolamento térmico na envoltória para limitar os ganhos de calor externos. É importante lembrar que os estudos realizados para a elaboração destas normas foram baseados predominantemente em climas frios e amenos.

Existem estudos que não recomendam a utilização de isolante nos componentes construtivos de edificações com altas cargas internas, por dificultar a perda de calor para o meio externo. Em climas quentes, o maior consumo costuma estar relacionado ao resfriamento, uma vez que a necessidade de aquecimento acaba sendo praticamente eliminada pelas cargas internas e os ganhos de calor externos. Por isso, é difícil

estabelecer a partir de que ponto é economicamente interessante inserir isolamento térmico na envoltória de edificações em climas quentes.

Desta forma, o desenvolvimento do presente trabalho irá analisar e identificar a validade das recomendações da ASHRAE Standard 90.1-2013 relacionadas à envoltória de edificações comerciais, em climas brasileiros.

MÉTODO

O método do trabalho é apresentado e dividido em cinco itens neste capítulo. Cada item detalha os procedimentos adotados para a realização do trabalho. O estudo foi realizado por meio de simulação computacional termo-energética. O programa escolhido para efetuar as simulações deste trabalho foi o *EnergyPlus* (DOE, 2014) versão 8.3, devido à confiabilidade de seus algoritmos e por ser um dos programas mais utilizados atualmente em pesquisas na área de eficiência energética em edificações.

Primeiramente, definiu-se um modelo de referência de edificação comercial de escritórios a ser utilizado. Após a definição do modelo, foram impostas variações na envoltória, na área de pavimento e na densidade de carga interna do modelo de referência a fim de verificar seus impactos no consumo de energia elétrica da edificação. O terceiro item do método aborda os climas brasileiros escolhidos para realizar as simulações e as variáveis climáticas escolhidas para serem analisadas nos resultados.

Os resultados obtidos foram utilizados para avaliar as recomendações da ASHRAE *Standard* 90.1 (2013), relacionadas à envoltória de edificações comerciais. Além dos resultados de consumo de energia elétrica, para determinados casos foram realizadas análises de ganhos de calor para possibilitar um melhor entendimento dos fenômenos de transferência de calor através da envoltória da edificação.

3.1 Definição do modelo de referência

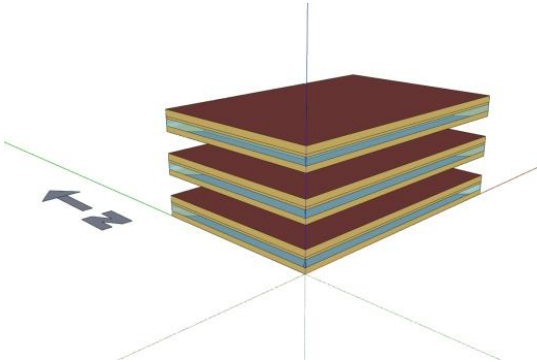
3.1.1 Geometria

O modelo de referência proposto para este estudo é uma edificação comercial do tipo escritório, de cinco pavimentos com aberturas nas quatro fachadas. A geometria do modelo proposto é inspirada no modelo de referência de escritório de médio porte do DOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos). Como apresentado na revisão bibliográfica, o conjunto de modelos de referência estabelecido pelo DOE serve como base para as recentes versões da ASHRAE *Standard* 90.1.

A edificação proposta como modelo de referência deste estudo apresenta pavimento térreo, pavimento tipo e cobertura. A elaboração do modelo de referência no programa foi realizada através do programa de simulação computacional *EnergyPlus*. O pavimento tipo da edificação

foi definido na altura equivalente ao terceiro andar (altura média entre o segundo e o quarto andar). Os pavimentos da edificação possuem as seguintes dimensões: 50,00 m x 33,33 m x 3,96 m. O pé direito útil é de 2,74 metros, distância do piso ao forro. A Figura 3.1 apresenta o modelo 3D do modelo de referência deste estudo, sendo importante lembrar que o pavimento tipo foi replicado três vezes, resultando em uma edificação que totaliza cinco andares.

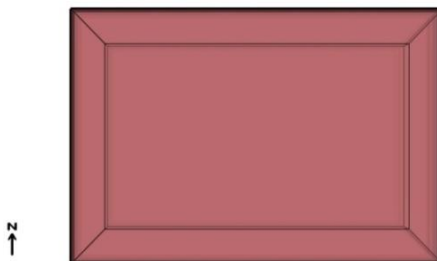
Figura 3.1. Modelo 3D do modelo de referência.



Acima do forro está o *plenum*, por onde passam os dutos de ventilação da edificação. Cada pavimento possui aproximadamente um total de 1660 m² de área e 328 m² de fachada. A relação entre fachada e área de piso equivale a 20%. As maiores fachadas da edificação estão voltadas para a orientação norte e para a orientação sul. O percentual de aberturas é igual para as quatro orientações da edificação, correspondendo a 33% da área da fachada.

Cada pavimento foi modelado com quatro zonas térmicas perimetrais e uma interna. Zona térmica é um espaço ou conjunto de espaços, dentro de uma edificação, que são suficientemente similares. No caso de edificações condicionadas artificialmente, as condições térmicas desejadas para uma zona térmica podem ser controladas usando um único termostato. As zonas térmicas perimetrais da edificação possuem 4,5 metros de largura, conforme recomendação da ASHRAE *Standard* 90.1 (2013). A Figura 3.1 apresenta a divisão dos pavimentos do modelo de referência em zonas térmicas.

Figura 3.2. Divisão dos pavimentos do modelo de referência em zonas térmicas.



Foram definidas paredes internas entre as zonas perimetrais e a zona central dos pavimentos da edificação. Responsáveis pelas divisões entre as zonas térmicas, as paredes internas do modelo de referência possuem 2,6 centímetros de espessura e são compostas de gesso.

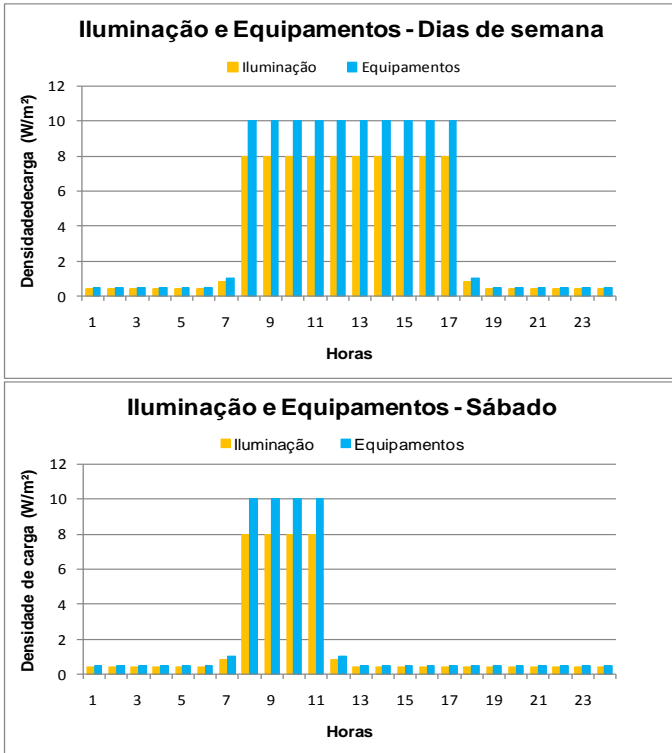
3.1.2 Cargas térmicas internas e externas

Visando a inclusão de ganhos internos de calor, o modelo de referência possui rotinas para a ocupação, para os equipamentos e para a iluminação. A densidade de ocupação do modelo de referência é de 10 m²/pessoa. A edificação é considerada ocupada das 8h00 até as 18h00 em dias de semana e das 8h00 até as 12h00 nos sábados. Durante o sábado, a edificação possui densidade de ocupação menor, equivalente à metade da densidade dos dias de semana. A edificação está ocupada durante 54 horas por semana. Considerando que o ano possui 52 semanas, o produto dos valores acima resulta em 2808 horas ocupadas por ano. O calor liberado pelas pessoas ao ambiente depende de sua atividade metabólica. Por sua vez, a atividade metabólica oscila em função do tipo e da intensidade da atividade realizada pelos indivíduos. Sendo assim, a atividade metabólica adotada para os usuários do modelo de referência foi de 120 W/pessoa, considerando que o indivíduo está realizando atividades de escritório. Para as pessoas, a fração radiante foi definida em 0,3 e a carga sensível e latente foram calculadas automaticamente pelo programa de simulação *EnergyPlus*.

Os equipamentos e a iluminação, presentes no ambiente de trabalho de um escritório, constituem o restante da carga térmica interna da edificação. No período ocupado, a densidade de potência de iluminação e a densidade de carga de equipamentos são equivalentes a 8 W/m² e 10 W/m², respectivamente. A fração radiante considerada para a

iluminação é de 0,7 e para os equipamentos é de 0,5. As rotinas de iluminação e equipamentos para os dias de semana e sábado, para o modelo de referência, estão apresentadas na Figura 3.3.

Figura 3.3. Rotinas de iluminação e de equipamentos para dias de semana e sábado.



Como é possível verificar na Figura 3.3, na hora anterior e posterior ao período ocupado, as densidades de iluminação e equipamentos atingem somente 10% do valor atribuído ao período ocupado. No domingo, as densidades de iluminação e equipamentos seguem os mesmos valores do período não ocupado, representando 5% do valor atribuído ao período ocupado, o que resulta em 0,04 W/m² e 0,05 W/m² respectivamente.

O modelo de referência possui elevadores, totalizando uma potência de 32225 W. A utilização dos elevadores varia de acordo com a ocupação da edificação. Nos resultados será apresentado o respectivo consumo dos elevadores e será incluído na categoria de equipamentos.

Para realizar simulações termo-energéticas de edificações, além de estabelecer as cargas internas, deve-se incluir a interação da edificação com o exterior. O entorno do modelo de referência é considerado urbano e não são adotadas proteções solares. A radiação solar incidente na edificação está relacionada a localização geográfica e conseqüentemente ao arquivo climático de cada cidade, os quais são abordados no terceiro capítulo do método deste trabalho.

A infiltração de ar na edificação é um fator a ser considerado na simulação do modelo, uma vez que interfere nas trocas de calor da edificação. A infiltração de ar é um processo comum e muitas vezes indesejado, quando a edificação já possui mecanismos de renovação de ar, por aumentar a carga térmica do ambiente e contribuir para um aumento no consumo de energia elétrica. A taxa de infiltração para as zonas perimetrais do modelo de referência foi definida em 0,3 trocas de ar por hora.

3.1.3 Sistema de condicionamento de ar

O Apêndice G da ASHRAE *Standard* 90.1 (2013) foi utilizado para escolha do sistema de condicionamento de ar. Foi adotado o Sistema 6, pelo fato do modelo de referência apresentar cinco pavimentos e área total entre 2.300 e 14.000 m². O sistema é composto por um splitão (*self contained*) acoplado a caixas de volume de ar variável.

Para regular a temperatura interna do ar do modelo de referência, adicionando ou retirando carga térmica, foram modelados três sistemas de condicionamento de ar, um para cada pavimento tipo. Cada pavimento possui um *plenum*, cuja respectiva zona térmica não é condicionada artificialmente. Na modelagem dos sistemas, definiu-se o retorno de ar pelo *plenum*. O valor de ajuste da temperatura de aquecimento foi definido em 18°C. O sistema de aquecimento de ar é elétrico. O valor de ajuste de temperatura de resfriamento foi estabelecido em 24°C. O sistema de condicionamento de ar opera durante doze horas em dias de semana, das 07h00 às 19h00, e durante cinco horas no sábado, das 07h00 às 12h00.

Inicialmente, o dimensionamento das unidades de condicionamento de ar foi realizado através dos dias de projeto de cada clima. Os dias de projeto foram estabelecidos de acordo com a NBR 16401-1: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: projetos das instalações (2008). Para o aquecimento foi adotado o dia de projeto de inverno, tendo como referência os valores de temperatura de bulbo seco. Para o resfriamento foi utilizado o dia de projeto de verão, tendo como base a pior condição entre a temperatura de bulbo seco e a máxima temperatura de bulbo úmido. Os dias de projeto de cada clima foram selecionados para atender 99,6% dos valores de temperatura externa possíveis. Se a unidade de condicionamento de ar atender às condições dos dias de projeto, supõe-se que a quase totalidade dos dias do ano será atendida. A Tabela 3.1 apresenta os dados dos dias de projeto adotados de acordo com o clima.

Tabela 3.1 Dados dos dias de projeto adotados para cada clima

| Cidade | Temperatura Inverno (°C) | | Temperatura Verão (°C) | |
|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| | Bulbo seco | Bulbo úmido | Bulbo seco | Bulbo úmido |
| Rio de Janeiro | 14,8 | 14,8 | 38,1 | 28,1 |
| Florianópolis | 7,5 | 7,5 | 32,2 | 26,6 |
| Curitiba | 2,4 | 2,4 | 30,9 | 23,2 |

Fonte: NBR 16401-1, 2008.

O dimensionamento inicial dos sistemas de condicionamento de ar não foi suficiente para satisfazer os requisitos de horas não atendidas para resfriamento, especialmente no clima do Rio de Janeiro. As zonas térmicas centrais e perimetrais oeste de cada pavimento estavam apresentando alto número de horas não atendidas. Para resolver o problema encontrado, a capacidade de resfriamento dos sistemas de condicionamento de ar foi majorada reduzindo o número de horas não atendidas a menos de 10% das horas ocupadas (INMETRO, 2012).

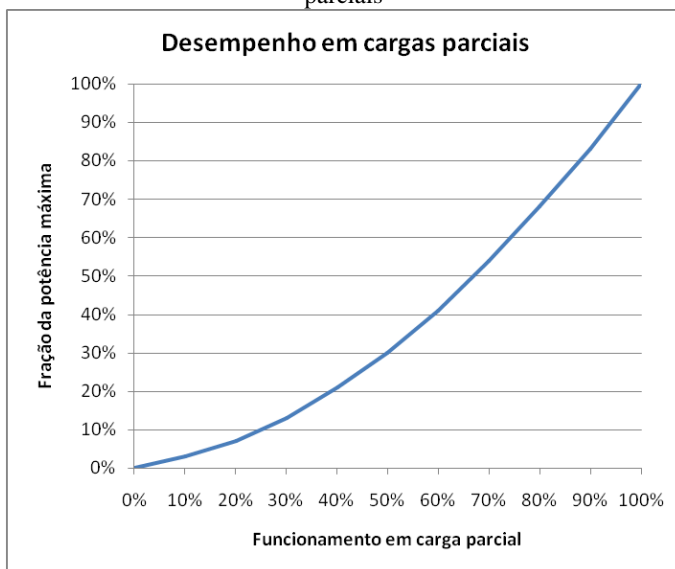
A curva de desempenho em carga parcial adotada, presente no Apêndice G da ASHRAE Standard 90.1 (2013), para o sistema de condicionamento está descrita pela Equação 3.1.

$$P_{fan} = 0,0013 + 0,1470 \times PLR_{fan} + 0,9506 \times (PLR_{fan})^2 - 0,0998 \times (PLR_{fan})^3 \quad (3.1)$$

Onde, P_{fan} = fração potência máxima; PLR_{fan} = funcionamento em carga parcial.

A curva de desempenho em cargas parciais possui relação direta com o consumo do sistema de condicionamento de ar, uma vez que define a fração da potência máxima utilizada para atender a respectiva demanda de carga. Por utilizar pequenas frações da potência máxima quando em carga parcial, é possível verificar que a *ASHRAE Standard 90.1 (2013)* define uma curva eficiente. A curva de desempenho em cargas parciais, resultante da equação citada, está na Figura 3.4.

Figura 3.4. Curva de desempenho do sistema de condicionamento em cargas parciais



Fonte: ASHRAE Standard 90.1, 2013.

A taxa de renovação do ar está definida em 34 m³/hora por pessoa. O valor adotado respeita a taxa mínima de 27 m³/hora por pessoa da resolução N^o 9 de 2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (2003). O sistema de condicionamento de ar é responsável pela renovação do ar por meio de ventilação forçada.

3.1.4 Envoltória

A envoltória possui relação direta com a carga térmica de uma edificação. Os materiais que compõem a envoltória devem ser adequadamente escolhidos de acordo com a tipologia, carga interna e

clima no qual a edificação está inserida. A envoltória estabelecida para o modelo de referência está de acordo com os requisitos da ASHRAE Standard 90.1 - 2013.

A parede externa do modelo de referência é composta por duas camadas de argamassa de 25 mm, voltadas para o exterior e para o interior da edificação, e por tijolos de oito furos circulares assentados na menor dimensão (100 mm) na camada intermediária. A cobertura da edificação também é constituída por três camadas, sendo composta do exterior para o interior por: telha de fibrocimento, câmara de ar de alta emissividade maior que 50 mm e laje de concreto de 100 mm. A absorvância das paredes externas é 0,4 e a absorvância da cobertura equivale a 0,6. O piso do modelo de referência possui uma laje de concreto de 20 centímetros de espessura apoiada no solo, com transmitância térmica equivalente a 3,48 W/(m².K). A influência do contato com o solo foi considerada através das temperaturas mensais médias do solo, retiradas dos arquivos climáticos.

Para o estudo, foram respeitados os limites de transmitância térmica máxima e a resistência mínima do isolante definidos para paredes pesadas. Para alcançar as transmitâncias térmicas (estabelecidas pela ASHRAE Standard 90.1 - 2013) adicionou-se isolamento térmico nos componentes construtivos da envoltória do modelo de referência.

Os valores de isolamento foram definidos de acordo com os limites de transmitância térmica e resistência térmica mínima do isolante da ASHRAE *Standard* 90.1-2013. Na cobertura, a camada de isolante foi inserida entre a laje de concreto de 100 mm e a câmara de ar. Nas paredes externas, o isolante ficou localizado entre a camada externa de argamassa (25 mm) e o tijolo de oito furos circulares assentado na maior dimensão (200 mm). A transmitância térmica resultante da cobertura e das paredes externas da envoltória do modelo de referência equivale a 0,205 W/(m².k) e 0,367 W/(m².k), respectivamente. Para o piso térreo, o isolante rígido foi inserido abaixo da laje de concreto, resultando em uma transmitância térmica de 0,412 W/(m².k). Nas janelas, o vidro é duplo e de baixa emissividade, com transmitância térmica de 1,705 W/(m².K) e fator solar de 0,19. Em suma, a envoltória do modelo de referência apresenta valores bastante inferiores de transmitância térmica quando comparada a maioria das envoltórias de edificações comerciais brasileiras.

3.2 Variações do modelo de referência

Realizaram-se variações na envoltória, na área de pavimento e na densidade de carga interna do modelo de referência, buscando verificar a influência destes parâmetros no consumo de energia elétrica normalizado pela área da edificação.

3.2.1 Área de pavimento

Para analisar o efeito das variações de escala da edificação, foram alteradas as áreas dos pavimentos do modelo de referência. O pé direito dos pavimentos manteve-se constante. A largura das zonas perimetrais do modelo manteve-se constante em 4,5 m, conforme recomendação da *ASHRAE Standard 90.1 (2013)*. As áreas de pavimento definidas para os novos modelos foram estabelecidas a partir das dimensões do modelo de referência. As áreas de cada modelo foram definidas levando em consideração o comprimento das fachadas da edificação. Os modelos 1 e 2 possuem fachadas com comprimentos 50% e 25% menores, respectivamente, em relação ao modelo de referência. Seguindo a mesma lógica, os modelos 3 e 4 possuem fachadas com comprimentos 25% e 50% maiores, respectivamente, quando comparados ao modelo de referência. Desta forma, os quatro novos modelos representam pontos equidistantes ao modelo de referência, em relação ao comprimento das fachadas da edificação. Logicamente, os valores de área de pavimento dos quatro novos modelos não são equidistantes, visto que a área é um produto do comprimento das fachadas. Cabe ressaltar que nos novos modelos definidos, assim como no modelo de referência, a proporção do comprimento da maior fachada (norte e sul) da edificação em relação à menor fachada (leste e oeste) é sempre de 1,5. A Tabela 3.2 apresenta os modelos estabelecidos com as respectivas dimensões de fachadas e áreas de pavimento.

Tabela 3.2 Variações de área de pavimento.

| Modelo | 1 | 2 | Referência | 3 | 4 |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|--------------|---------|
| Comprimento das fachadas (m) | 16,67 x 25 | 25 x 37,50 | 33,33 x 50 | 41,67 x 62,5 | 50 x 75 |
| Área do pavimento (m ²) | 418 | 938 | 1660 | 2606 | 3750 |

Para cada um dos novos modelos, foi obtido o consumo anual de energia elétrica por metro quadrado. Os resultados foram interpretados

de acordo com as características das envoltórias adotadas e as especificações climáticas de cada cidade.

3.2.2 Envoltória

Para verificar as diferenças de consumo e de trocas de calor com envoltórias diferentes, foram estabelecidas outras duas envoltórias para a edificação, nomeadas de Brasil-1 e Brasil-2. A primeira é comumente encontrada em edificações comerciais brasileiras e a segunda diferencia-se da primeira somente pelo vidro. Vidros diferentes possibilitam verificar a influência da escolha do vidro no consumo de energia elétrica de edificações comerciais. O vidro adotado nas aberturas da envoltória Brasil-1 é o vidro comum de 6 mm. A transmitância térmica do vidro comum é de $5,78 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e seu fator solar é de 0,82. Substituindo o vidro comum, na envoltória Brasil-2 encontra-se um vidro de controle solar laminado de 8 mm, com fator solar 0,30 e transmitância térmica $5,70 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. O vidro de controle solar adotado foi escolhido com o objetivo de diminuir consideravelmente os ganhos solares através da janela, sem perder os possíveis benefícios de um vidro com transmitância térmica alta. Importante destacar que deste ponto em diante, a envoltória do modelo de referência está referenciada com o nome de envoltória Ashrae, por apresentar características que atendem a norma *ASHRAE Standard 90.1*.

A Tabela 3.2 apresenta as envoltórias estabelecidas, com os valores de transmitância térmica e fator solar de seus respectivos componentes.

Tabela 3.3 Variações nos componentes da envoltória.

| Envoltória | Ashrae | Brasil-1 | Brasil-2 |
|--|--------|----------|----------|
| Transmitância térmica da cobertura [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$] | 0,205 | 2,13 | 2,13 |
| Transmitância térmica das paredes externas [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$] | 0,367 | 2,34 | 2,34 |
| Transmitância térmica do vidro nas aberturas [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$] | 1,705 | 5,78 | 5,70 |
| Fator solar do vidro | 0,19 | 0,82 | 0,30 |

3.2.3 Densidade de carga interna

Foram modificados os valores de densidade de equipamentos, iluminação e pessoas, a fim de verificar o comportamento das tipologias

com carga interna baixa, média e alta. A Tabela 3.5 apresenta os valores de carga térmica equivalente (W/m^2) para as respectivas densidades de ocupação (m^2/pessoa), de acordo com a atividade metabólica de 120 W/pessoa .

Tabela 3.4 Equivalência da variação da densidade de ocupação.

| Densidade de ocupação | Baixa | Média | Alta |
|---|-------|-------|------|
| Ocupação (m^2/pessoa) | 15 | 10 | 5 |
| Carga térmica (W/m^2) | 8 | 12 | 24 |

Fonte: o autor, 2015.

Para a iluminação e os equipamentos, os valores de densidade de carga interna baixa e alta foram definidos sendo 50% inferiores e 50% superiores à densidade de carga interna média, conforme a Tabela 3.5 abaixo.

Tabela 3.5 Variação da densidade de carga térmica interna.

| Densidade de carga térmica interna | Baixa | Média | Alta |
|--|-------|-------|------|
| Ocupação (W/m^2) | 8 | 12 | 24 |
| Iluminação (W/m^2) | 4 | 8 | 12 |
| Equipamentos (W/m^2) | 5 | 10 | 15 |
| Total (W/m^2) | 17 | 30 | 51 |

Fonte: o autor, 2015.

As variações de densidade de carga interna foram adotadas para as três envoltórias e os três climas definidos. Obtiveram-se resultados de consumo de energia elétrica por metro quadrado para cada envoltória e clima, de acordo com a densidade de carga interna. As condições de troca de calor entre o ambiente interno e externo variam de acordo com a envoltória, clima e densidade de carga interna da edificação.

3.3 Arquivos climáticos

Além das cargas internas, existe a influência de variáveis externas a edificação, que variam ao longo das horas do dia e das estações do ano, como por exemplo, os valores de temperatura externa, a radiação solar incidente, a temperatura do solo, a velocidade do vento e a umidade. Este conjunto de variáveis climáticas está presente no arquivo

climático de cada cidade. O arquivo climático apresenta as características de determinado clima, ao longo das 8760 horas anuais.

Os arquivos climáticos adotados para o estudo foram escolhidos de modo a representarem as zonas climáticas 1A, 2A e 3A definidas pela ASHRAE *Standard 169 - Climatic Data for Building Design Standards* (2013). Através da escolha de cidades destas três zonas climáticas, a intenção é representar climas muito quentes, quentes e amenos. Foram adotados os arquivos climáticos TRY (*Test Reference Year*) das cidades do Rio de Janeiro (1963), Florianópolis (1963) e Curitiba (1969) representando as zonas climáticas 1A, 2A e 3A, respectivamente. Para detalhar a temperatura de cada clima, foram realizadas breves análises dos arquivos climáticos escolhidos.

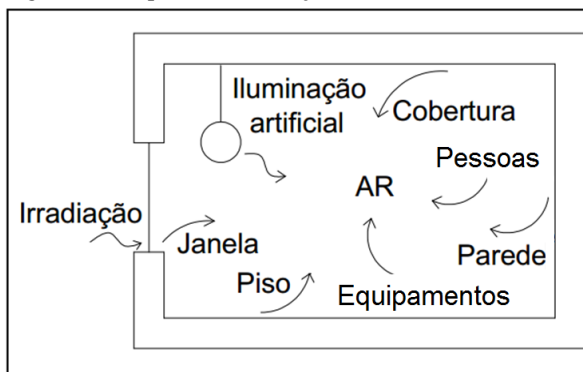
3.4 Avaliação do modelo de referência

Para cada clima adotado, o modelo de referência foi avaliado por meio do consumo total de energia elétrica por metro quadrado (kWh/m^2). Após detalhar o consumo total do modelo de referência em usos finais, foram listados os consumos de iluminação, equipamentos, aquecimento, resfriamento e ventiladores. Os consumos com iluminação e equipamentos serão iguais para os modelos, desde que apresentem a mesma densidade de carga interna.

Por outro lado, os consumos com aquecimento, resfriamento e ventiladores terão relação direta com a necessidade de condicionamento artificial na edificação, variando de acordo com o clima e a envoltória, mesmo que possuam a mesma densidade de carga interna. Para comprovar a influência do clima sobre o consumo, foram realizadas correlações entre os graus-hora de resfriamento do clima com o consumo do modelo de referência, em cada clima. A temperatura base de resfriamento foi definida em 15°C .

Além do consumo de energia elétrica, foi analisado o balanço térmico para uma zona do modelo de referência, obtendo-se o fluxo de calor horário que passa pelas superfícies da zona analisada. O balanço térmico em edificações envolve os processos de condução, convecção e de radiação. Estes processos ocorrem nas superfícies internas e externas dos elementos da edificação. Os ganhos de calor externos, internos e do sistema de condicionamento de ar são essenciais para o cálculo do balanço térmico do ambiente, ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 Esquema de balanço térmico em um ambiente.



Fonte: modificado de Melo e Lamberts, 2008.

O método utilizado para obter e analisar os ganhos e perdas de calor, neste trabalho, é baseado no cálculo do fluxo de calor por convecção entre as temperaturas de cada superfície com a temperatura do ambiente no qual a superfície está inserida. O balanço térmico fornece informações importantes para verificar a influência de cada parâmetro da envoltória no consumo de edificações de escritórios. Por meio do balanço térmico, é possível analisar em detalhe o consumo de energia elétrica do modelo de referência. O somatório de ganhos e perdas de calor indica a quantidade de calor que está sendo adicionada ou retirada do ambiente, por unidade de tempo.

Por meio do balanço térmico, foi possível averiguar por quais superfícies da envoltória da edificação ocorreram os maiores ganhos e perdas de calor. Com base nos relatórios de saída do *EnergyPlus*, para cada superfície da zona analisada, a cada hora, obteve-se um valor de ganho ou perda de calor em *watts* (W). Considerando que as simulações foram realizadas para o ano inteiro, para cada variável da zona térmica, obtiveram-se 8760 valores horários referentes aos ganhos de calor. Realizando-se a integração destes valores ao longo do ano, obtiveram-se os dados para realizar o balanço térmico anual. Entre as variáveis englobadas pelo balanço térmico estão os ganhos provenientes de pessoas, iluminação, equipamentos, paredes, forro e vidros. Concomitantemente aos ganhos e perdas através da envoltória, é possível obter a quantidade de energia térmica que está sendo

adicionada ou removida do ambiente pelo sistema de condicionamento de ar.

3.5 Análises de sensibilidade

Supondo que na condição de densidade de carga térmica alta encontram-se as maiores diferenças de resultados de consumo, realizaram-se análises de sensibilidade utilizando como base os casos de carga interna alta, no clima do Rio de Janeiro.

As análises de sensibilidade deste trabalho englobam a absorvância das paredes externas da edificação, o regime de funcionamento do sistema de condicionamento de ar, a adoção de cargas térmicas internas muito altas e a utilização de arquivos climáticos de outro banco de dados (RORIZ, 2014). Estes parâmetros citados foram considerados relevantes para serem investigados por meio de conjuntos adicionais de simulações.

De acordo com a absorvância das paredes externas da edificação, será absorvida uma maior ou menor quantidade de energia pela envoltória. Os resultados de consumo de energia elétrica de uma edificação condicionada artificialmente dependem de uma série de parâmetros relacionados ao sistema de condicionamento de ar, inclusive seu regime de funcionamento. Por exemplo, em caso de cargas térmicas muito altas, a edificação pode apresentar anormalidades no consumo de resfriamento.

RESULTADOS

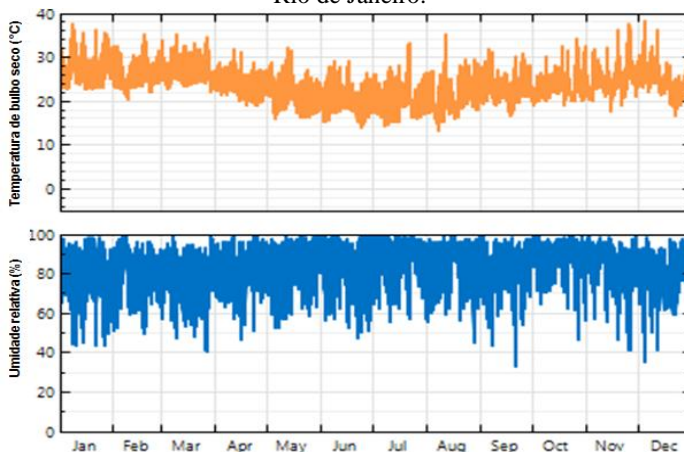
Este capítulo apresenta os resultados do trabalho. Entre os resultados, estão incluídos os gráficos, tabelas e as considerações relativas aos arquivos climáticos, à avaliação do modelo de referência, ao balanço térmico e à análise das variações posteriormente realizadas a partir do modelo de referência.

4.1 Análise dos arquivos climáticos

4.1.1 Temperatura e umidade relativa

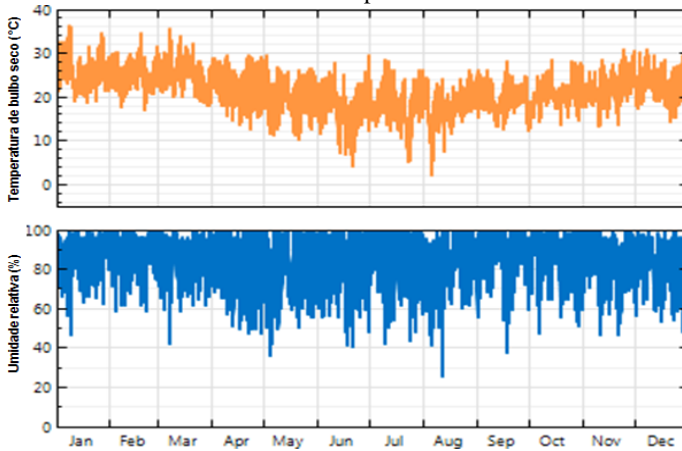
A análise dos arquivos climáticos permite verificar características do clima e possíveis inconsistências nos dados. A Figura 4.4 apresenta os dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido dos climas escolhidos.

Figura 4.1. Temperaturas de bulbo seco e umidade relativa ao longo do ano no Rio de Janeiro.



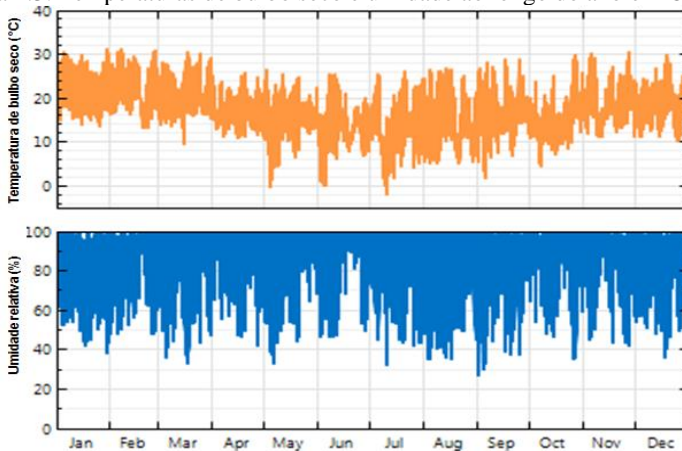
A cidade do Rio de Janeiro apresentou temperaturas diárias médias variando de 21°C a 32°C durante o verão e entre 17°C a 26°C durante o inverno. A média diária da umidade relativa do ar variou predominantemente entre 59% e 96%, chegando a valores mínimos de 40% em determinados dias. A Figura 4.4 apresenta as temperaturas de bulbo seco e a umidade relativa para Florianópolis.

Figura 4.2. Temperaturas de bulbo seco e umidade relativa ao longo do ano em Florianópolis.



O verão em Florianópolis apresentou amplitude térmica considerável, com temperaturas diárias médias de 19°C a 28°C. Durante o inverno as temperaturas diárias médias oscilaram entre 8°C e 22°C. Florianópolis apresentou médias diárias altas de umidade relativa ao longo do ano, em sua maioria entre 67% e 97%. A Figura 4.4 apresenta as temperaturas de bulbo seco e a umidade relativa para Curitiba.

Figura 4.3. Temperaturas de bulbo seco e umidade ao longo do ano em Curitiba.



Comparado aos dados de Rio de Janeiro e Florianópolis, o verão no clima de Curitiba apresentou temperaturas diárias médias mais amenas, variando de 13°C a 24°C. O inverno oscilou predominantemente entre as temperaturas diárias médias de 5°C e 19°C. Curitiba apresentou médias diárias de umidade relativa do ar entre 69% e 99%, ao longo do ano.

Como investigações adicionais também foram levantadas as temperaturas máximas, médias e mínimas (de bulbo seco e de bulbo úmidos) presentes nos arquivos climáticos adotados, apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Principais dados de temperatura dos arquivos climáticos

| Temperatura | Bulbo seco | | | Bulbo úmido | | |
|----------------|------------|--------|-------|-------------|--------|-------|
| | Máxima | Mínima | Média | Máxima | Mínima | Média |
| Rio de Janeiro | 38,1 | 13,0 | 23,6 | 29,2 | 12,3 | 21,2 |
| Florianópolis | 35,8 | 3,1 | 20,7 | 31,5 | 2,4 | 18,8 |
| Curitiba | 30,8 | -1,4 | 16,3 | 23,6 | -1,5 | 14,6 |

Os dados levantados desta forma possibilitam compreender a magnitude das diferenças de temperatura entre os climas, assim como as amplitudes térmicas de cada clima analisado.

4.1.2 Graus-hora de resfriamento

Através do arquivo climático, foram calculados os graus-hora de resfriamento para cada clima adotado nas simulações. O método dos graus-hora consiste em realizar um somatório anual das temperaturas horárias que ultrapassam a temperatura base definida (no caso específico) de resfriamento. A Tabela 4.1 expõe o somatório de graus-hora de resfriamento obtido para cada clima, a partir de uma temperatura de bulbo úmido de 15°C.

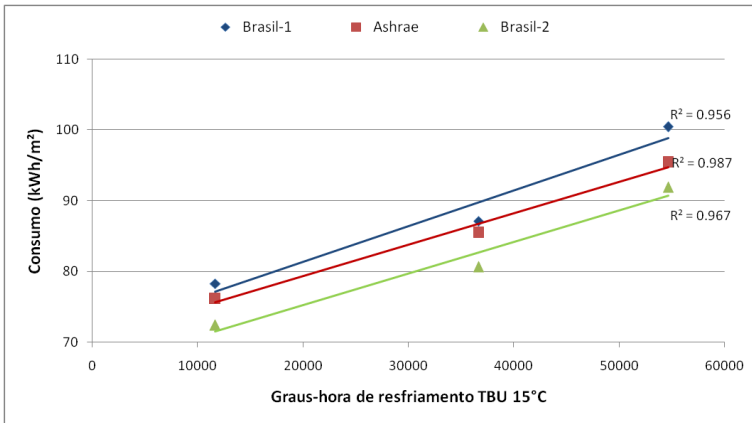
Tabela 4.2 Somatório de graus-hora de resfriamento por clima

| Clima | GHR TBU 15°C |
|----------------|--------------|
| Rio de Janeiro | 54629 |
| Florianópolis | 36642 |
| Curitiba | 11666 |

Para os três climas, foram realizadas correlações entre o somatório de graus-hora de resfriamento e o consumo de energia elétrica

obtido para o modelo de referência. A correlação foi realizada para verificar a influência que o primeiro parâmetro exerce sobre o segundo. A Figura 4.4 apresenta a correlação entre os graus-hora de resfriamento dos climas e o consumo de energia elétrica do modelo de referência.

Figura 4.4. Correlação entre graus-hora dos climas e consumo de energia elétrica do modelo de referência



De modo geral, quanto menor o somatório de graus-hora do clima, menor é o gasto de energia elétrica para climatizar as zonas da edificação. Esta tendência é confirmada pela correlação acima, onde os maiores consumos de energia elétrica estão associados ao clima com maior somatório de graus-hora de resfriamento. Os marcadores localizados na extremidade direita do gráfico estão relacionados ao clima do Rio de Janeiro, no qual se obteve o maior somatório de graus-hora de resfriamento para o clima. Visto que não há isolamento térmico nos componentes opacos da envoltória e o vidro comum possui transmitância térmica e fator solar altos, o clima exerce maior influência no consumo de energia elétrica do modelo de referência que adota a envoltória Brasil-1. O clima de Curitiba apresenta o menor somatório de graus-hora, por ter um clima de temperaturas mais amenas. Porém, o clima de Curitiba apresenta valores de incidência de radiação solar superiores aos do clima de Florianópolis. Logo, deduz-se que os valores de consumo obtidos no clima de Curitiba estão um pouco acima do esperado, por causa da influência da radiação solar sobre o consumo, que está incluída somente no eixo vertical da correlação.

4.2 Avaliação do modelo de referência

Esta seção apresenta os resultados de consumo de energia elétrica do modelo de referência, para as três envoltórias, nas três zonas climáticas escolhidas: 1A, 2A e 3A.

4.2.1 Consumos de energia elétrica

Os consumos anuais de energia elétrica (kWh) foram divididos pela área total da edificação, resultando em consumos anuais por metro quadrado (kWh/m²). Os consumos anuais da edificação estão relacionados aos sistemas de condicionamento de ar, iluminação e equipamentos. Sendo que a densidade de carga interna adotada foi igual para os três climas, os consumos com iluminação e equipamentos somaram 22,78 kWh/m² e 34, 16 kWh/m² respectivamente, para o modelo de referência. Dentro da categoria de equipamentos, aproximadamente 5,68 kWh/m² são atribuídos aos elevadores. A Tabela 4.3 apresenta o comparativo dos consumos finais de energia elétrica em kWh/m² por ano, do modelo de referência de acordo com a envoltória e clima estabelecidos.

Tabela 4.3 Consumos anuais do modelo de referência de acordo com a envoltória

| Envoltória | Consumo [kWh/m ²] | Rio de Janeiro | Florianópolis | Curitiba |
|------------|-------------------------------|----------------|---------------|----------|
| Ashrae | Aquecimento | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Resfriamento | 32,66 | 23,89 | 15,28 |
| | Ventilação | 5,83 | 4,63 | 3,91 |
| | Total | 95,43 | 85,46 | 76,13 |
| Brasil1 | Aquecimento | 0,00 | 0,07 | 1,26 |
| | Resfriamento | 36,75 | 25,32 | 16,17 |
| | Ventilação | 6,77 | 4,80 | 3,91 |
| | Total | 100,45 | 87,12 | 78,27 |
| Brasil2 | Aquecimento | 0,00 | 0,09 | 1,68 |
| | Resfriamento | 29,88 | 20,08 | 11,21 |
| | Ventilação | 5,10 | 3,55 | 2,58 |
| | Total | 91,91 | 80,66 | 72,40 |

A diferença nos consumos finais de energia elétrica, de acordo com a envoltória e o clima, é perceptível. No clima do Rio de Janeiro, o sistema de aquecimento de ar não é utilizado, independentemente da

envoltória adotada. Por outro lado, o consumo com resfriamento foi o maior entre os climas analisados. Somado com o respectivo consumo de ventiladores, o consumo de energia elétrica com resfriamento varia entre 38% e 43% do consumo anual total da edificação, dependendo da envoltória adotada.

Em Florianópolis, o sistema de condicionamento de ar voltado ao aquecimento é raramente utilizado, representando aproximadamente 0,1% do consumo da edificação, utilizando as envoltórias Brasil-1 e Brasil-2. Em Florianópolis, adotando-se a envoltória Ashrae, o aquecimento não é utilizado e o resfriamento é responsável de 29% a 35% do consumo total de energia elétrica da edificação, de acordo com a envoltória adotada.

Comparado aos dois climas anteriores, o aquecimento é um pouco mais expressivo em termos de consumo para o clima de Curitiba. Somado ao respectivo consumo de ventiladores, o aquecimento é responsável por 2% do consumo da edificação, exceto no modelo com a envoltória Ashrae. Em relação às outras zonas climáticas, o resfriamento é responsável por uma parcela menor de consumo, mas ainda significativa. O consumo com resfriamento, somado aos respectivos consumos de ventiladores, oscila entre 19% e 25% do consumo total da edificação em Curitiba, dependendo da envoltória utilizada.

Nota-se que o modelo de referência (envoltória Ashrae) apresenta consumo de energia elétrica menor em relação ao modelo com envoltória Brasil-1. Para o modelo de referência, as diferenças de consumo de energia elétrica entre os três climas analisados são menores, uma vez que a envoltória mais isolada termicamente bloqueia grande parte da influência do clima sobre o consumo da edificação. Interessante notar que, devido ao isolamento térmico, a necessidade de aquecimento de ar foi praticamente eliminada nos três climas.

Utilizando-se a envoltória Ashrae, o consumo relacionado ao resfriamento sofreu reduções consideráveis, especialmente no Rio de Janeiro, apresentando uma diminuição de 12% em relação ao modelo de referência com envoltória Brasil-1. Levando em consideração que a envoltória Brasil-2 diferencia-se da envoltória Brasil-1 somente pelo vidro, a economia no consumo de energia elétrica é expressiva nos climas nos três climas.

Em todos os climas analisados, o consumo de energia elétrica obtidos com a utilização da envoltória Brasil-2 foram inferiores inclusive aos modelos que adotam a envoltória Ashrae. O vidro

laminado com baixo fator solar da envoltória Brasil-2 limita os ganhos de calor pelo vidro durante o dia e permite a perda benéfica de calor para o meio externo durante a noite.

4.2.2 Horas não atendidas

As horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar variaram de acordo com o clima em que a edificação estava inserida. O clima do Rio de Janeiro, por ser o mais quente, foi o responsável pelo maior número de horas não atendidas para o resfriamento. O clima de Curitiba, por ser menos quente, foi o único a apresentar horas não atendidas para o aquecimento, como demonstrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.4 Horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar

| Horas não atendidas | Aquecimento | | | Resfriamento | | |
|---------------------|-------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | Ashrae | Brasil-1 | Brasil-2 | Ashrae | Brasil-1 | Brasil-2 |
| Envoltória | | | | | | |
| Rio de Janeiro | 0 | 0 | 0 | 125 | 132 | 85 |
| Florianópolis | 0 | 0 | 0 | 117 | 98 | 64 |
| Curitiba | 0 | 8 | 15 | 52 | 74 | 32 |

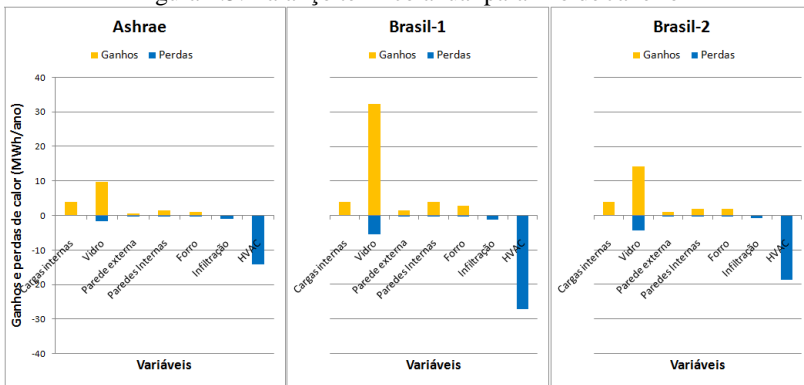
Considerando que o modelo de referência possui cerca de 2800 horas ocupadas anualmente, as horas não atendidas resultantes estão bastante abaixo do valor limite para horas não atendidas que é 10% das horas ocupadas, segundo o RTQ-C (INMETRO, 2012). Os valores obtidos também estão de acordo com a ASHRAE *Standard* 90.1 - 2013, que estabelece um valor máximo de 300 horas não atendidas.

4.3 Análise dos ganhos de calor

Por meio da realização de análises preliminares de balanço térmico em zonas perimetrais da edificação, concluiu-se que as zonas do pavimento da cobertura apresentam maiores ganhos de calor externo, quando comparadas às zonas do pavimento tipo e térreo. Devido ao número de ambientes do modelo de referência, o balanço térmico foi realizado em uma determinada zona, com o objetivo de obter os fluxos de calor entre as superfícies e o ambiente. Para análises posteriores de balanço térmico, efetuou-se a escolha da zona perimetral oeste da cobertura, por ser a zona mais exposta aos ganhos de calor externos, seguida pelas zonas perimetrais leste, norte e sul.

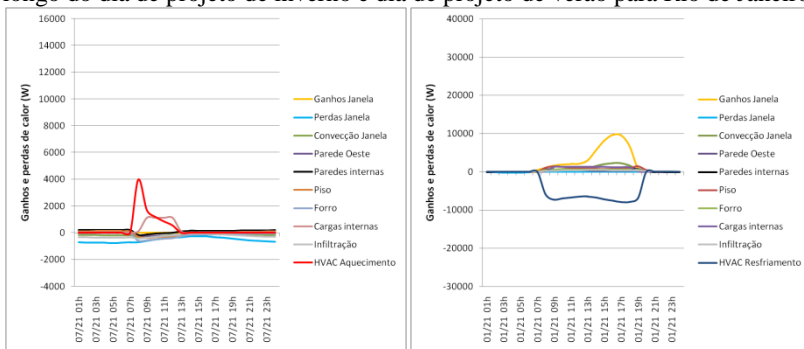
Analisaram-se os ganhos de calor da zona escolhida, por meio dos fluxos de calor através das respectivas superfícies, exigidos em valores horários nos relatórios de saída do *EnergyPlus*. Após serem separados em perdas ou ganhos de calor e integrados anualmente, os valores obtidos foram dispostos em gráficos. Nos gráficos, estão ilustradas as fontes e as magnitudes dos ganhos de calor na zona estabelecida para o dia de projeto de verão, o dia de projeto de inverno e para o ano todo. A Figura 4.5 ilustra os primeiros balanços térmicos realizado, referentes ao clima do Rio de Janeiro.

Figura 4.5. Balanço térmico anual para Rio de Janeiro



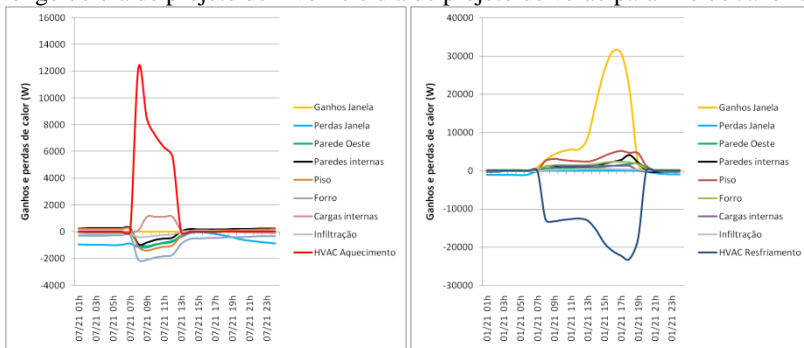
Para o balanço térmico anual no Rio de Janeiro, o principal ganho de calor acontece através do vidro. O piso das zonas da cobertura foi considerado adiabático nas simulações, por isso, o mesmo não está presente nos gráficos do balanço térmico. Ganhos consideráveis de calor também acontecem através do forro, por causa da radiação solar incidente na cobertura. A Figura 4.5 ilustra a análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Ashrae para o clima de Rio de Janeiro, durante os dias de projeto de inverno e de verão.

Figura 4.6. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Ashrae ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Rio de Janeiro



No dia de projeto de inverno é nítida a ativação do sistema de aquecimento de ar no início do período de ocupação da edificação. Com relação ao dia de projeto de verão, os maiores ganhos também ocorrem através da janela, especialmente no período da tarde, uma vez que a zona analisada está na fachada oeste. A Figura 4.5 apresenta a mesma análise de ganhos e perdas de calor, adotando-se a envoltória Brasil-1.

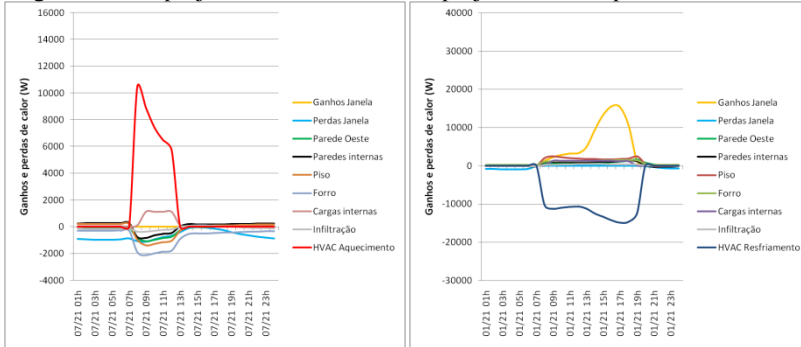
Figura 4.7. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-1 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Rio de Janeiro



No dia de projeto de inverno, utilizando a envoltória Brasil-1, a maior parte das perdas de calor acontece através do forro e da janela. Interessante destacar que as perdas através do forro intensificam-se somente após o ambiente ter sido aquecido pelo sistema de condicionamento de ar, resultado do aumento da diferença de temperatura interna e externa. Seguindo a mesma lógica, a Figura 4.5

apresenta a análise diária de ganhos e perdas de calor, utilizando-se a envoltória Brasil-2, para os dias de projeto de inverno e de verão.

Figura 4.8. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-2 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Rio de Janeiro

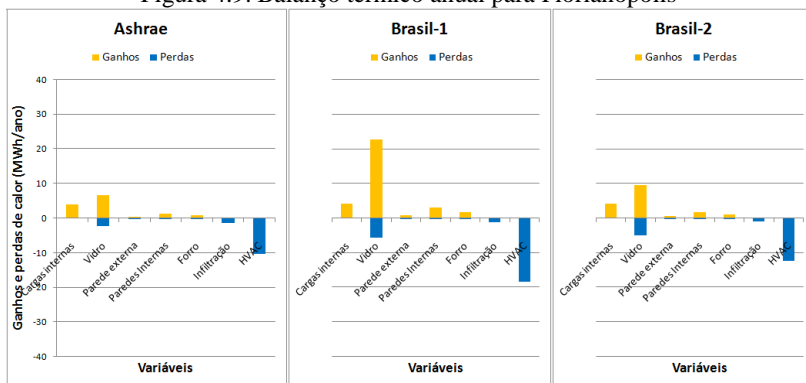


Por meio de análises mais detalhadas, descobriu-se que dentre as paredes internas, a maior contribuição de calor é proveniente da parede leste, que faz a divisória entre a zona analisada e a zona central do pavimento da cobertura. As perdas de calor para o exterior acontecem predominantemente através do vidro e por infiltração. O sistema de condicionamento de ar foi o principal responsável por retirar a carga térmica da zona e manter a temperatura do ambiente abaixo do limite estabelecido para o resfriamento.

Por meio da envoltória Ashrae, os ganhos de calor provenientes do meio externo são amenizados pelo isolamento térmico. A adoção do vidro duplo permitiu reduzir quase 70% os ganhos de calor em relação ao vidro comum. O mesmo fenômeno acontece com as perdas de calor através do vidro, reduzidas aproximadamente 75% em relação à envoltória Brasil-1. Em situações de carga interna mais alta, a envoltória isolante apresentaria dificuldade em perder calor para o ambiente externo, resultando em aumento do consumo de energia elétrica com condicionamento. Para a envoltória Brasil-2, nota-se que os ganhos pelo vidro são aproximadamente 60% inferiores aos ganhos pelo vidro da envoltória Brasil-1, e cerca de 40% superiores em relação aos respectivos ganhos da envoltória Ashrae. Porém, por apresentar uma transmitância térmica alta, o vidro laminado também permite maiores perdas de calor para o ambiente.

As análises de ganhos e perdas de calor também foram realizadas para Florianópolis e Curitiba. Para estes climas, as análises anuais estão apresentadas abaixo, enquanto que as análises diárias foram inseridas no Apêndice A. A Figura 4.9 abaixo contém o balanço térmico anual para Florianópolis, realizado com a utilização das três envoltórias.

Figura 4.9. Balanço térmico anual para Florianópolis



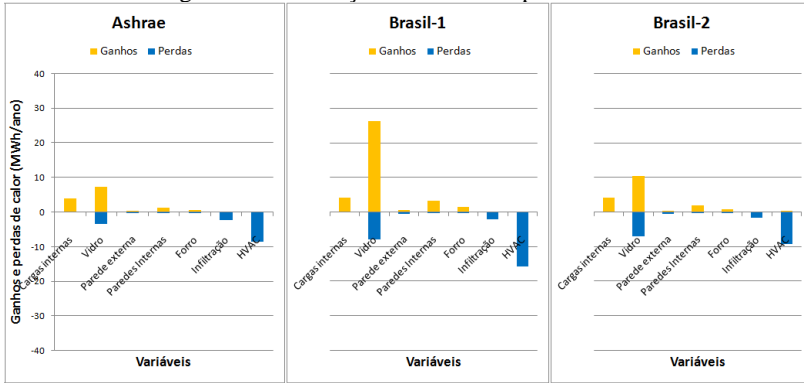
No balanço térmico, realizado para Florianópolis, é possível verificar que o maior ganho de calor também ocorre pela janela. A análise dos ganhos de calor contribui no entendimento do consumo de energia elétrica e dos picos de carga do sistema de condicionamento de ar do modelo de referência. Novamente, o sistema de condicionamento de ar é o grande responsável pela retirada da carga térmica da zona.

Analisando o balanço térmico para Florianópolis, utilizando-se a envoltória Ashrae, os ganhos de calor são bastante reduzidos. Por ser mais isolada termicamente, a envoltória Ashrae promove uma diminuição de consumo em relação ao modelo com envoltória Brasil-1. Interessante notar que até mesmo os ganhos provenientes das outras zonas internas são reduzidos, especialmente da zona central. Depois da inserção do isolamento térmico, a cobertura da zona central ganha muito menos calor proveniente do meio externo, o que diminui consideravelmente a dissipação do calor para as zonas perimetrais. Por outro lado, o calor liberado pelas pessoas, pela iluminação e pelos equipamentos, torna-se mais relevante para a edificação. O balanço térmico anual da zona, utilizando-se a envoltória Brasil-2 em Florianópolis, apresentou a mesma tendência e os maiores ganhos de calor acontecem pela janela. Quando comparados com os respectivos

resultados obtidos para o Rio de Janeiro, os ganhos de calor pela janela foram aproximadamente 30% menores. Novamente, comparando-se ao modelo com mesma envoltória, simulado para o Rio de Janeiro, as perdas de calor (benéficas) através do vidro foram ligeiramente maiores.

A Figura 4.10 abaixo apresenta o balanço térmico anual da zona térmica para cada envoltória utilizada, no clima de Curitiba.

Figura 4.10. Balanço térmico anual para Curitiba



Para o clima de Curitiba, as envoltórias tiveram comportamento ligeiramente diferente, uma vez que clima apresenta temperaturas mais amenas. A tendência verificada para o balanço térmico anual repete-se e os maiores ganhos de calor também acontecem através do vidro. Em relação às perdas de calor, a zona térmica apresenta aproximadamente o dobro de perdas pelo vidro quando comparada, com a mesma envoltória, no Rio de Janeiro. O sistema de condicionamento de ar é o responsável por retirar a maior parcela de calor da zona térmica, seguido pelo vidro. Novamente, os ganhos pelas paredes internas acontecem por causa da dissipação do calor da zona central para as zonas periféricas. Neste clima, apesar de praticamente não ser visível no gráfico, o sistema de condicionamento de ar precisa ser acionado nos meses mais frios, especialmente nas primeiras horas ocupadas do dia, para contrabalançar as perdas de calor através da envoltória.

Para Curitiba, assim como para os outros climas, adotando-se a envoltória Ashrae, os ganhos e perdas de calor para o exterior são minimizados. A infiltração começa a exercer uma influência maior no balanço térmico, visto que as temperaturas externas são mais baixas. O

balanço térmico anual permitiu identificar que os ganhos de calor pelo vidro em Curitiba foram superiores aos respectivos ganhos em Florianópolis, para as três envoltórias. Porém, os ganhos de calor através das superfícies opacas foram inferiores quando comparados aos encontrados para Florianópolis. Estes dados fazem sentido, visto que Curitiba possui temperaturas menores por estar localizada a cerca de 900 metros de altitude, porém, está mais exposta a radiação solar por localizar-se mais próxima à linha do Equador, quando comparada a Florianópolis.

A análise dos balanços térmicos realizados nesta etapa possibilitou quantificar e identificar os maiores ganhos e perdas de calor na zona perimetral oeste da cobertura do modelo de referência, utilizando três possíveis envoltórias. O balanço térmico anual pode ser mais difícil de analisar, em relação a períodos de tempo menores, mas de modo geral, percebe-se que a maior parte dos ganhos de calor ocorre através do vidro. As perdas de calor pela cobertura foram pouco relevantes para a maioria dos modelos. O *plenum* localizado entre o forro do pavimento e a cobertura acabou agindo de forma similar à de um isolante, dificultando as trocas térmicas através da cobertura. A janela foi o elemento construtivo da envoltória que apresentou a influência mais expressiva sobre o balanço térmico da zona, dentre todas as variáveis consideradas. É importante esclarecer que a zona térmica adotada é a que apresenta os maiores ganhos de calor externo. As zonas térmicas restantes da edificação apresentam ganhos e perdas de calor distribuídas de forma diferente. Especificamente na zona térmica analisada, a envoltória Ashrae conseguiu bloquear grande parte dos ganhos de calor externos, refletindo em uma menor demanda de condicionamento de ar. Nos três climas analisados, destacam-se também os ótimos desempenhos da envoltória Brasil-2, que além de reduzir significativamente os ganhos de calor, possibilita perdas benéficas de calor para o ambiente externo.

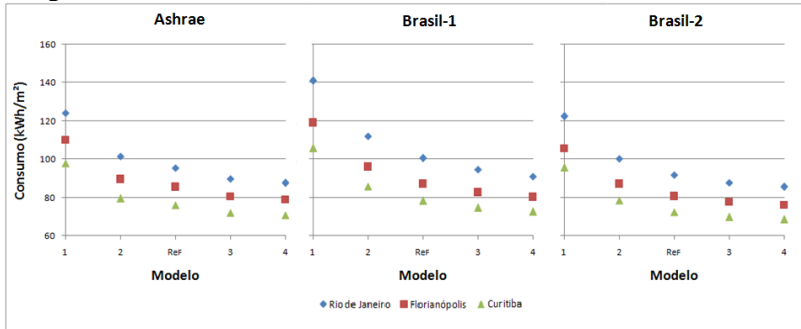
4.4 Análise das variações do modelo de referência

Os resultados obtidos por meio das variações realizadas no modelo de referência estão apresentados abaixo. Primeiramente, foram expostas as análises relacionadas à variação de área de pavimento, e em seguida, aquelas relacionadas à variação na densidade de carga interna. Os resultados obtidos anteriormente, através do balanço térmico, ajudaram nas análises das variações do modelo de referência.

4.4.1 Área de pavimento

Após a variação na área de pavimento do modelo de referência, foram obtidos os consumos de energia elétrica dos modelos 1, 2, 3 e 4. O clima do Rio de Janeiro, por ser o mais quente, continua relacionado aos maiores consumos por metro quadrado e o clima de Curitiba, por ser o mais ameno, continua relacionado aos menores consumos. Os resultados de consumo de energia elétrica dos modelos 1, 2, 3 e 4 estão apresentados na Figura 4.11, para cada uma das três envoltórias elaboradas.

Figura 4.11. Consumos dos modelos 1, 2, 3 e 4 de acordo com a envoltória

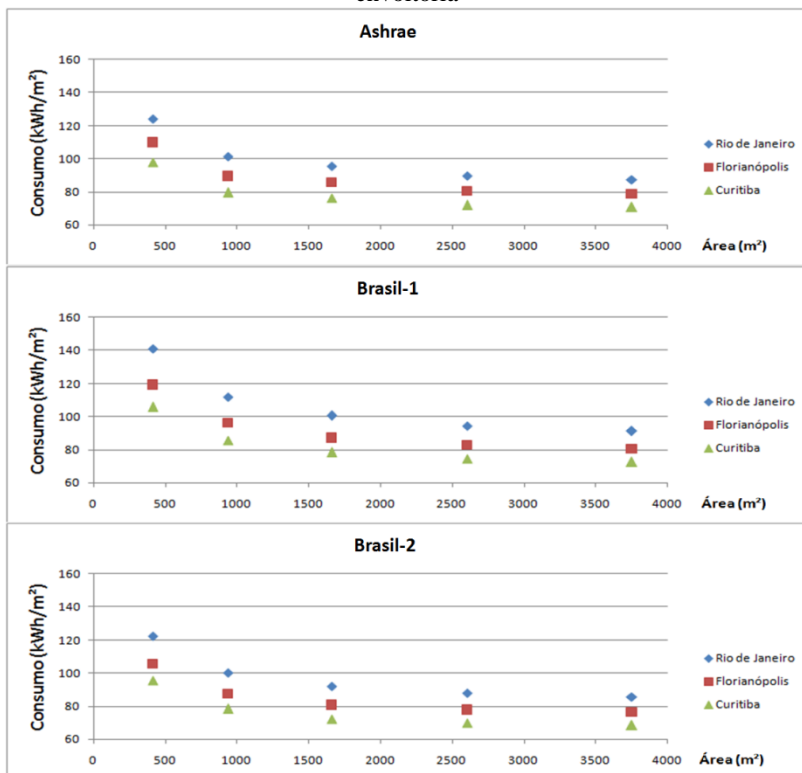


Analisando os resultados acima, nota-se que, à medida que a área de pavimento diminui, o consumo de energia elétrica aumenta, porque a edificação está mais vulnerável ao ambiente externo. Em edificações menores, o clima no qual a edificação está inserida exerce maior influência sobre a demanda de resfriamento das zonas térmicas, refletindo em um maior consumo de energia elétrica. Seguindo a mesma lógica, à medida que a área de pavimento da edificação aumenta, ocorre uma diminuição no consumo de energia elétrica. Este fenômeno acontece porque as edificações maiores possuem menor proporção de área de envoltória por área construída, o que reflete em menor influência do clima sobre o consumo com condicionamento.

Interessante notar que a diferença de consumo do mesmo modelo entre os climas também diminui com o aumento da área de pavimento da edificação. Teoricamente, para valores de área de pavimento muito elevados, os consumos de energia elétrica convergiriam para valores

muito próximos, independentemente do clima e envoltória. Os resultados de consumo de energia elétrica, de acordo com a área de pavimento e a envoltória estão apresentados na Figura 4.12.

Figura 4.12. Consumos de acordo com a área de pavimento da edificação e envoltória



Os consumos de energia elétrica, referentes à envoltória Ashrae, apresentam diferenças menores entre os climas, quando comparados aos da envoltória Brasil-1. Esta menor diferença está relacionada ao maior isolamento térmico da envoltória, responsável por reduzir o impacto do clima sobre o consumo da edificação. A menor transmitância térmica da envoltória também modifica ligeiramente a curva obtida a partir dos resultados de consumo de energia elétrica. A inclinação da curva de consumo é menos acentuada em relação aos resultados obtidos com a envoltória Brasil-1, à medida que se aproxima ao eixo vertical. Em

suma, edificações menores podem diminuir seu consumo de energia elétrica ao adotarem envoltórias com transmitância térmica baixa, por estarem menos expostas à influência do clima.

Pode-se concluir que, modificando-se a relação dimensional entre fachada e área de pavimento, altera-se o consumo de energia elétrica da edificação. Este fenômeno é mais acentuado em edificações com áreas de pavimento inferiores a 2500 m² e em climas mais extremos. O consumo de energia elétrica está relacionado com a dimensão da edificação, visto que os ganhos e perdas de calor, através das superfícies opacas e translúcidas da envoltória, possuem maior impacto em edificações menores.

4.4.2 Densidade de carga interna

Alterações na densidade de carga interna da edificação afetam as trocas de calor nas zonas térmicas e conseqüentemente refletem no consumo de energia elétrica da edificação. Os resultados de consumo de energia elétrica apresentados pelos modelos com as respectivas densidades de carga interna (DCI) estão apresentados abaixo.

Figura 4.13. Consumos de acordo com a densidade de carga interna baixa

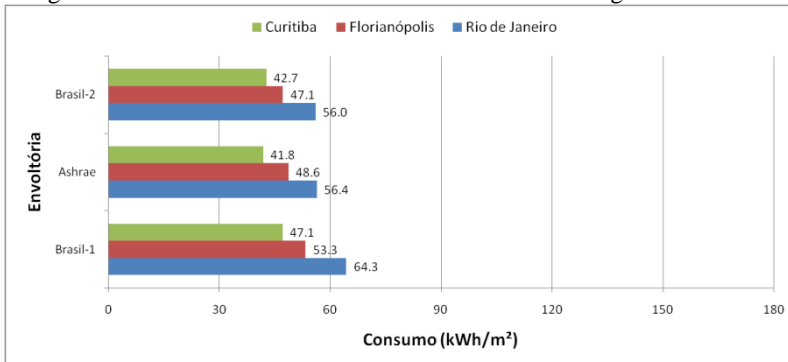


Figura 4.14. Consumos de acordo com a densidade de carga interna média

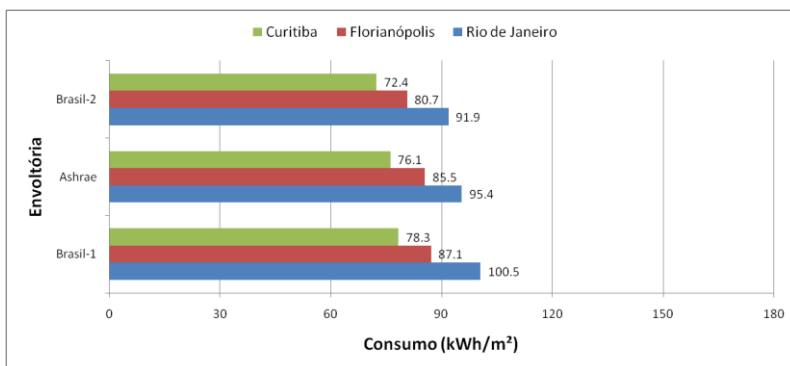
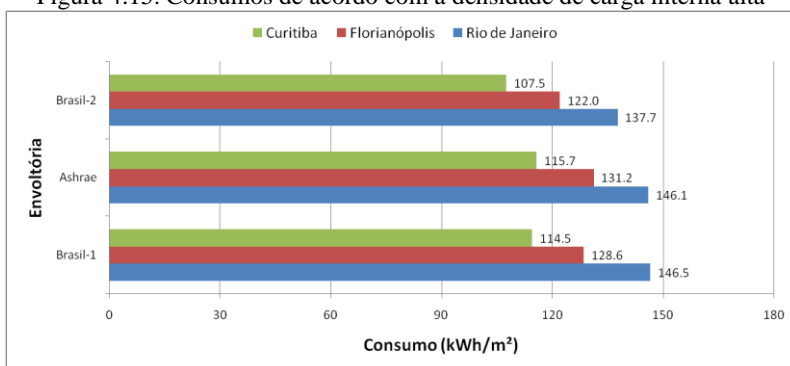


Figura 4.15. Consumos de acordo com a densidade de carga interna alta



Como esperado, os consumos de energia elétrica por metro quadrado variaram de acordo com a densidade de carga interna, ou seja, à medida que a densidade aumentou o consumo também aumentou. Porém, a variação no consumo de energia elétrica da edificação não foi somente proporcional ao aumento ou diminuição na densidade de carga interna. Dependendo da envoltória e do clima, a edificação conseguiu dissipar maior ou menor quantidade de calor para o ambiente externo. Este fenômeno é mais acentuado em edificações com densidade de carga interna alta. Sendo assim, uma parte da energia térmica proveniente das cargas internas não precisa ser processada pelo sistema de condicionamento de ar, garantindo uma redução no consumo de energia elétrica da edificação. Para facilitar a comparação, os resultados de

consumo anuais de energia elétrica também estão expostos na Tabela 4.3, de acordo com a densidade de carga interna e clima no qual a edificação está inserida.

Tabela 4.5 Consumos de acordo com a envoltória, densidade de carga interna e clima

| Consumos (kWh/m ²) | | | | |
|--------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Densidade de carga interna | Clima | Envoltória Ashrae | Envoltória Brasil-1 | Envoltória Brasil-2 |
| Baixa | Curitiba | 41,84 | 47,10 | 42,73 |
| | Florianópolis | 48,64 | 53,27 | 47,14 |
| | Rio de Janeiro | 56,38 | 64,34 | 56,02 |
| Média | Curitiba | 76,13 | 78,27 | 72,40 |
| | Florianópolis | 85,46 | 87,12 | 80,66 |
| | Rio de Janeiro | 95,43 | 100,45 | 91,91 |
| Alta | Curitiba | 115,74 | 114,45 | 107,46 |
| | Florianópolis | 131,22 | 128,56 | 121,98 |
| | Rio de Janeiro | 146,06 | 146,54 | 137,71 |

A envoltória Brasil-1 apresentou os maiores consumos para as densidades de carga interna baixa e média, em todos os climas. Para todos os climas, merecem destaque os resultados dos modelos com a envoltória Brasil-2 (vidro laminado de controle solar), por apresentarem os menores consumos para todas as densidades de carga, exceto para Curitiba no modelo com baixa densidade de carga interna. O vidro da envoltória Brasil-2 impede grande parte dos ganhos de calor por radiação, enquanto facilita a dissipação de calor interno devido à sua alta transmitância térmica. No clima de Curitiba, o modelo com densidade de carga baixa equipado com a envoltória Brasil-2 apresentou um consumo mais elevado que o esperado. Analisando-se os consumos finais do modelo, descobriu-se que este aumento no consumo de energia elétrica da edificação deve-se à maior utilização do sistema de condicionamento para aquecimento.

Baseando-se nas análises de balanço térmico realizadas anteriormente, pode-se afirmar que os resultados de consumo apresentados pela utilização da envoltória Ashrae são inferiores aos da envoltória devido principalmente a diferença entre os vidros de cada uma. Para edificações comerciais situadas em climas quentes, é interessante elaborar uma envoltória que consiga filtrar os ganhos de calor da edificação e ao mesmo tempo, possibilite a perda dos excessos

de calor internos para o exterior, especialmente em edificações comerciais com carga interna alta.

Em climas quentes, as recomendações da ASHRAE *Standard 90.1 - 2013* devem ser repensadas, porque a inserção de isolamento na envoltória restringe drasticamente as trocas de calor entre o meio interno e externo da edificação, por exemplo, impedindo perdas de calor para o exterior durante a noite. O aperfeiçoamento de outros componentes da envoltória, de acordo com a densidade de carga interna da edificação e o clima onde a mesma está inserida, pode refletir em maiores economia de energia elétrica pelo sistema de condicionamento de ar.

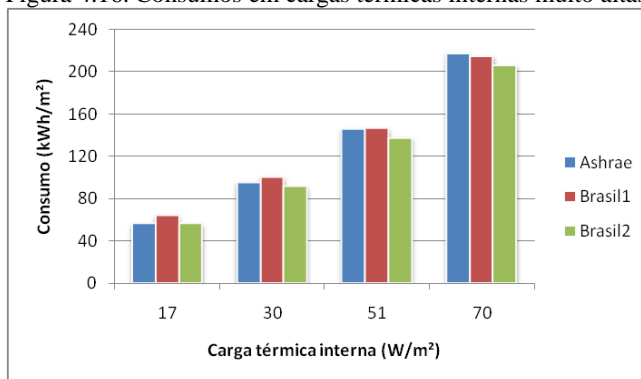
4.5 Análise de sensibilidade

Os resultados das análises de sensibilidade estão separados por temas e apresentados abaixo. Importante lembrar que para serem obtidos os resultados, foram utilizados como base os casos de carga interna alta, no clima do Rio de Janeiro.

4.5.1 Densidade de carga térmica interna muito alta

Está exposta, na Figura 4.12, a análise relacionada à carga térmica interna muito alta (70W/m^2).

Figura 4.16. Consumos em cargas térmicas internas muito altas.



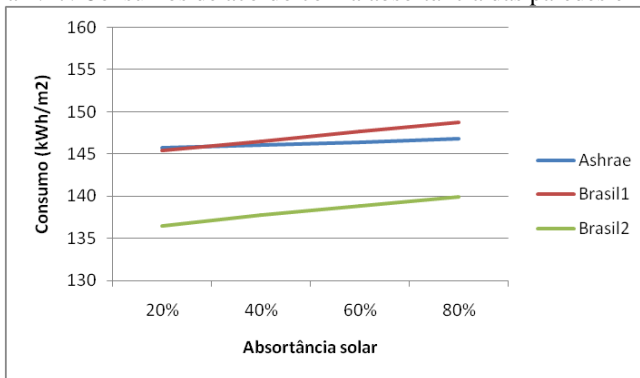
Observando os dados acima, é possível verificar que com o aumento da carga térmica interna, o consumo de energia elétrica da edificação aumenta não linearmente, devido ao conseqüente aumento do consumo com condicionamento de ar. Interessante notar que na medida

em que a carga térmica interna aumenta o consumo obtido para a edificação com envoltória Ashrae torna-se maior em relação às outras. Este resultado reforça a teoria que relaciona a ausência de isolamento térmico a consumos menores de energia elétrica, em cargas térmicas internas elevadas e climas quentes. A diferença entre o consumo das envoltórias sem isolamento está basicamente no vidro, que influencia na quantidade de calor que entra na edificação através da radiação solar.

4.5.2 Absortância solar de paredes externas

Os resultados da análise relacionada à absortância solar das paredes externas da edificação estão dispostos abaixo, na Figura 4.12.

Figura 4.17. Consumos de acordo com a absortância das paredes externas.

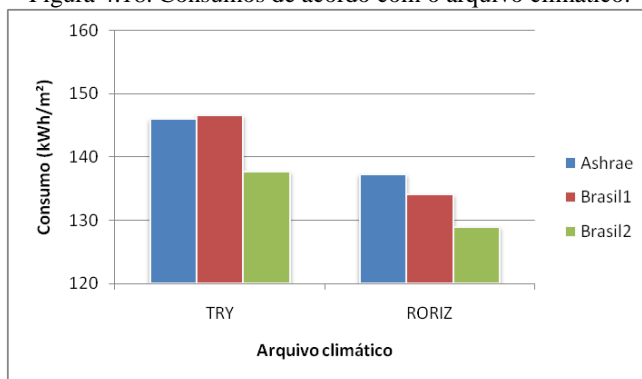


Por não apresentarem isolamento térmico, as edificações com envoltórias Brasil-1 e Brasil-2 sofreram maior influência no consumo de energia elétrica pela mudança de valor da absortância solar das paredes externas. As diferenças de consumo entre o menor e o maior valor de absortância testados resultaram em menos de 1% para a envoltória Ashrae e entre 2% e 3% para as envoltórias Brasil-1 e Brasil-2.

4.5.3 Diferentes arquivos climáticos

É facilmente perceptível a influência dos dados presentes no arquivo climático sobre o consumo de energia elétrica da edificação por meio da Figura 4.12 abaixo.

Figura 4.18. Consumos de acordo com o arquivo climático.

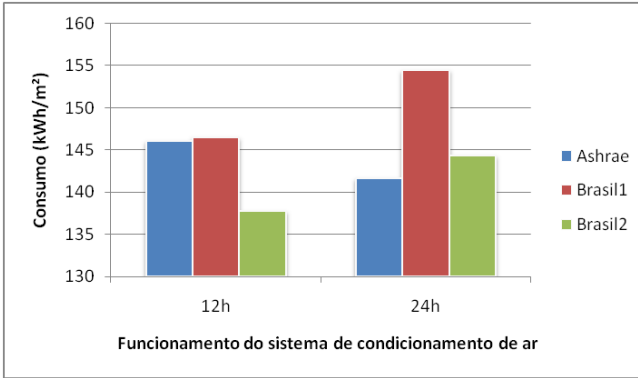


A maior diferença entre os dois tipos de arquivos climáticos analisados está na curva de distribuição diária da radiação solar. Comparando os dois tipos de arquivo, as diferenças percentuais entre os resultados de consumo de energia elétrica oscilaram de 5% para a envoltória Ashrae até quase 9% para a envoltória Brasil-1. Percebe-se que a qualidade dos dados climáticos presentes no arquivo climático influencia fortemente no resultado da simulação.

4.5.4 Funcionamento do sistema de condicionamento de ar

A quantidade de horas em que a edificação é condicionada artificialmente possui relação direta com o consumo energético da mesma. A Figura 4.12 contém os resultados de dois regimes de funcionamento do sistema de condicionamento de ar: 12h e 24h.

Figura 4.19. Consumos de acordo com o funcionamento do sistema de condicionamento de ar.



O regime estabelecido para o funcionamento do sistema de condicionamento de ar define também o modo e a intensidade com que as cargas térmicas são adicionadas ou retiradas das zonas térmicas da edificação, impactando novamente no consumo do sistema de condicionamento de ar. A diferença no perfil de cargas térmicas a serem retiradas da edificação justifica a diminuição do consumo de energia elétrica, mesmo tendo dobrado o número de horas em operação do sistema.

CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões relacionadas aos resultados obtidos, expõe as limitações do estudo e sugere temas para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar as recomendações da *ASHRAE Standard 90.1*, com foco na envoltória de edificações comerciais. Pelo fato de ser uma norma reconhecida internacionalmente, a *ASHRAE Standard 90.1* possui forte influência na elaboração de outras normas de eficiência energética ao redor do mundo.

Foram efetuadas simulações computacionais para obter os resultados de consumo de energia elétrica que por sua vez serviram de base para as análises. O trabalho baseou-se em uma análise mais detalhada de quase uma centena de simulações. O foco do trabalho não esteve em verificar as diferentes possibilidades de combinações para os componentes da envoltória. Os objetivos específicos do trabalho foram atendidos através da realização da análise das trocas de calor (balanço térmico) e da análise da influência de diversos parâmetros sobre o consumo de energia elétrica de edificações comerciais.

Ao longo da realização do trabalho foi possível perceber a dificuldade para a elaboração de recomendações para a envoltória. As propriedades termofísicas da envoltória mais adequada variaram de acordo com a densidade de carga interna e o clima onde está localizada a edificação, dificultando consideravelmente uma solução única e simples.

A análise dos ganhos de calor permitiu identificar que o vidro é a superfície da zona térmica analisada que possui maior influência na troca de calor do meio interno com o externo. Ponderando os resultados de consumo para os três climas, pode-se afirmar que a envoltória e seus componentes construtivos tiveram forte influência sobre o consumo de energia elétrica da edificação.

Utilizando o somatório de graus-hora de resfriamento de cada clima como parâmetro de avaliação, comprovou-se que edificações situadas em climas com maiores somatórios de graus-hora apresentam maiores consumos de energia elétrica. Verificou-se que há correlação entre os dois parâmetros citados acima. Porém, para prever com precisão o consumo de energia elétrica da edificação não é suficiente adotar

somente o somatório de graus-hora de resfriamento. Para obter resultados mais precisos, deve-se incluir a incidência de radiação solar na análise, devido aos grandes ganhos de calor através do vidro.

A análise das simulações e dos resultados demonstra que as recomendações de envoltória da ASHRAE *Standard* 90.1 podem ser aplicadas em edificações com densidades de carga interna baixa e climas amenos ou frios. Com base nos resultados obtidos neste trabalho, as respectivas recomendações não contribuem para reduções no consumo de energia elétrica para densidades de carga elevadas e climas quentes. Por exemplo, uma envoltória altamente isolada termicamente aplicada em centrais de atendimento não seria adequada, exatamente por serem edificações que possuem densidade de carga interna elevada.

Em substituição a aplicação de isolamento térmico, a adoção de um vidro de controle solar ou até de sistemas de sombreamento, pode ser suficiente para reduzir substancialmente o consumo da edificação, visto que segundo os resultados, uma grande parcela dos ganhos de calor é proveniente do vidro.

Considerando-se o modelo de referência e os climas analisados, conclui-se que as recomendações da ASHRAE *Standard* 90.1 - 2013, referentes à envoltória não são adequadas para edificações comerciais situadas em climas quentes, como é o caso de uma grande parte dos climas brasileiros. As recomendações poderiam ser elaboradas de maneira mais específica, levando em consideração a densidade de carga interna e o clima, sem necessariamente priorizar o uso de isolamento térmico. A área de pavimento e o volume da edificação também deveriam ser considerados nas recomendações, visto que com o aumento das dimensões da edificação, o impacto da envoltória sobre o consumo de energia elétrica diminui.

5.2 Limitações

Para a realização das simulações, foram estabelecidos determinados parâmetros. As limitações deste trabalho estão relacionadas aos itens abaixo, pois poderiam ter sido considerados de formas diferentes.

a) Os resultados obtidos e conclusões estão relacionados a uma tipologia de edificação de escritório. Adotando as mesmas envoltórias

definidas neste trabalho, os consumos de outras tipologias de edificações comerciais podem apresentar uma tendência diferente.

b) Para atender as recomendações da ASHRAE *Standard* 90.1 relacionadas à envoltória, foram adotados valores pontuais de transmitância térmica para os componentes da envoltória. Os valores foram fixados igualmente para os três climas a fim de obter resultados comparáveis entre si.

c) O sistema de condicionamento de ar está modelado de acordo com a curva de eficiência em cargas parciais sugerida pela ASHRAE *Standard* 90.1.

d) O trabalho analisou somente as paredes externas consideradas pesadas. A ASHRAE *Standard* 90.1 também define valores limites para a transmitância térmica de paredes externas leves, apesar de não serem valores muito diferentes. Somente na zona climática 1A, os valores limites de transmitância térmica diferem consideravelmente entre paredes pesadas e leves.

e) Foi elaborada somente uma envoltória de acordo com as recomendações da ASHRAE *Standard* 90.1, atendendo os limites de transmitância térmica dos componentes da envoltória das três zonas climáticas simultaneamente.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

A envoltória exerce uma grande influência no consumo de energia elétrica da edificação. Entretanto, para conjunto de parâmetros climáticos e de uso, existem composições de elementos da envoltória que proporcionam maior eficiência energética. Algumas sugestões para trabalhos futuros, relacionados ao tema, estão descritas abaixo:

a) Incluir na análise o custo econômico ou o período de retorno do investimento relacionado à utilização de isolamento térmico na envoltória ou substituição dos vidros.

b) Realizar análises paramétricas englobando maior número de parâmetros combinações possíveis entre parâmetros da envoltória de edificações comerciais, de acordo com as recomendações da ASHRAE *Standard* 90.1.

c) Elaborar recomendações de transmitância térmica para a envoltória de edificações comerciais brasileiras, especificamente de acordo com o clima, a área de pavimento e densidade de carga interna.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.220: Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.220: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.575: Edificações de até cinco pavimentos - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.401: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: projetos das instalações**. Rio de Janeiro, 2008.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1–1989. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 1989.

_____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1–1999. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 1999.

_____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1–2007. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2007.

_____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1–2010. American

Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2010.

_____. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1–2013. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2013.

_____. **Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. ASHRAE Standard 62.1–2004. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2004.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bankbranches in Brazil. **Energy and Buildings**, v.82, p. 82-91, 2014.

BOYANO, A.; HERNANDEZ, P.; WOLF, O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations. **Energy and Buildings**, v.65, p. 19-28, 2013.

BRASIL. Lei n. 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, DF, 2001a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/LEIS_2001/L10295.htm>. Acesso em: Abril de 2015.

BRASIL. Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei n° 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Brasília, DF, 2001b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/D4059.htm>. Acesso em: Abril de 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução – RE 19, de 16 de janeiro de 2003. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. 2003.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais.** (Tese de doutorado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CHIRARATANANON, S.; HIEN, V. D.; TUMMU, P. Thermal performance and cost effectiveness of wall insulation under thai climate. **Energy and Buildings**, v. 45, p. 82-90, 2012.

CHVATAL, K. **Relação entre o Nível de Isolamento Térmico da Envoltura dos Edifícios e o Potencial de Sobreaquecimento no Verão.** (Tese de doutorado). Engineering Sciences, Université de Porto, 2007.

CORGNATI, S. P.; FABRIZIO, E.; FILIPPI, M.; MONETTI, V. Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. **Applied Energy**, v.102, p. 983-993, 2013.

CROWE, E; FALLETTA, K.; BROOK, M.; REGNIER, J.; CONTOYANNIS, D. California's Commercial Building Energy Asset Rating System (BEARS): Technical Approach and Design Considerations. **ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, 2012.

DOE. **United States Department of Energy.** Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: Setembro de 2014.

_____. **United States Department of Energy.** Building Energy Codes Program. Disponível em: <<http://www.energycodes.gov/commercial-prototype-building-models>>. Acesso em: Outubro de 2014.

GELLER, H. S. **Energy Revolution: policies for a sustainable future.** Washington, D.C.: Island Press, 2003.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, p. 4107-4120, 2007.

GBC BRASIL. **Green Building Council Brasil**. Disponível em: <<http://www.gbcbrazil.org.br/graficos-empresendimentos.php>>. Acesso em: Março de 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeção da população do Brasil por sexo e idade: 2000-2060**, 2014.

IEA. International Energy Agency. **Energy Efficiency Market Report 2014 Executive Report**, 2014.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Rio de Janeiro, 2012.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2012.

KAYNAKLI, O. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 415-425, 2012.

MELO, A. P. **Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais**. (Dissertação de Mestrado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MELO, A. P; LAMBERTS, R. **Método do balanço térmico através de simulação computacional no Energyplus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 2008.

MELO, A.P; SORGATO, M.J; LAMBERTS, R. Building energy performance assessment: Comparison between ASHRAE Standard 90.1 and Brazilian regulation. **Energy and Buildings**, v.70, p. 372-383, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**, Brasil, 2014. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em Outubro de 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**, Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/>>. Acesso em: Março de 2015.

NEWSHAM, G. R.; MANCINI, S.; BIRT, B. J. Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... **Energy and Buildings**, v.41, p. 897-905, 2009.

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock**, 2014.

OZEL, M. Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate. **Energy Conversion and Management**, v. 66, p. 106-114, 2013.

SCOFIELD. Efficacy of LEED-certification in reducing energy consumption and greenhouse gas emission for large New York City office buildings. **Energy and Buildings**, v.67, p. 517-524, 2013.

SOZER, H. Improving energy efficiency through the design of the building envelope. **Building and Environment**, v.45, p. 2581-2593, 2010.

TAMANINI, T. **Modelo predominante de edifícios de escritórios para análise energética em Florianópolis**. (Trabalho de Iniciação Científica). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

TODESCO, G. Super-Efficient Buildings: How low can you go? **ASHRAE Journal**. Atlanta, Dezembro, 1996.

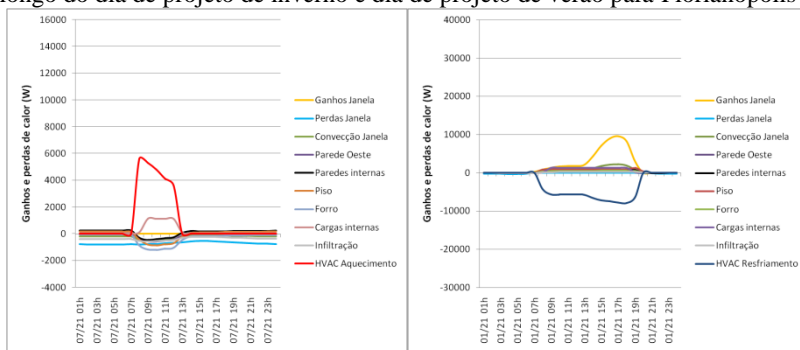
PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v.40, p. 394-398, 2008.

PICCO, M.; LOLLINI, R.; MARENGO, M. Towards energy performance evaluation in early stage building design: A simplification methodology for commercial building models. **Energy and Buildings**, v.76, p. 497-505, 2014.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Regression analysis of electric energy consumption of commercial buildings in Brazil. In: International IBPSA Building Simulation Conference. 2007. **Proceedings...**Beijing, China: BS2007.

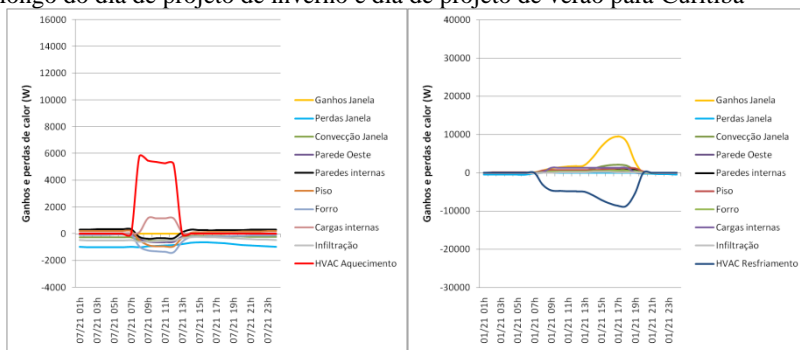
APÊNDICE A – ANÁLISES DE GANHOS E PERDAS DE CALOR

Figura A.1. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Ashrae ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Florianópolis



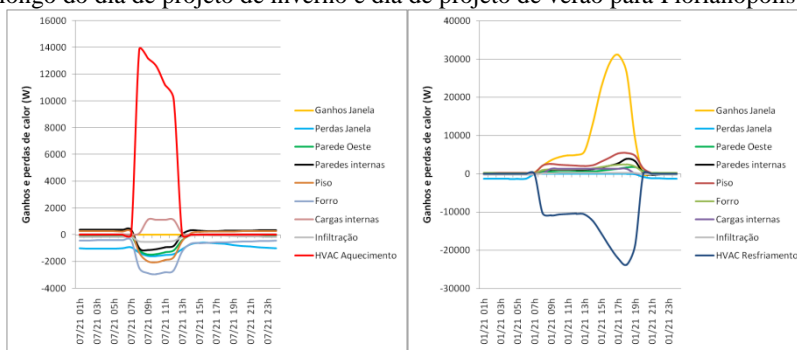
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura A.2. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Ashrae ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Curitiba



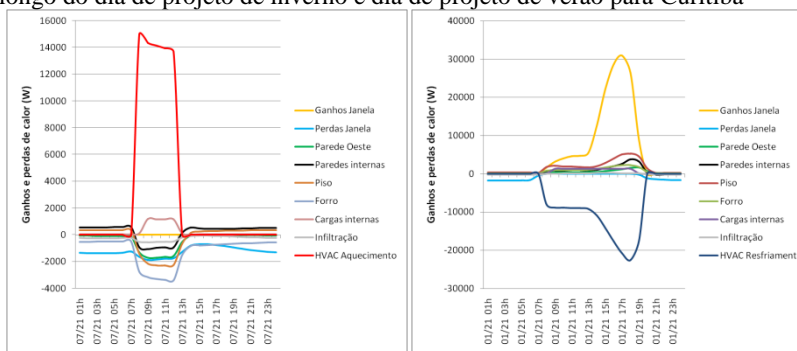
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura A.3. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-1 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Florianópolis



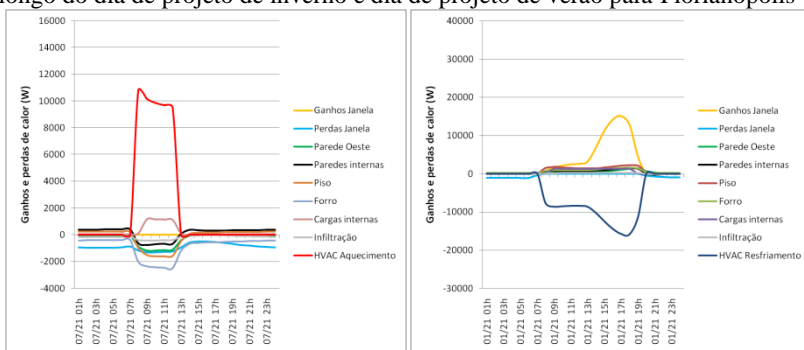
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura A.4. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-1 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Curitiba



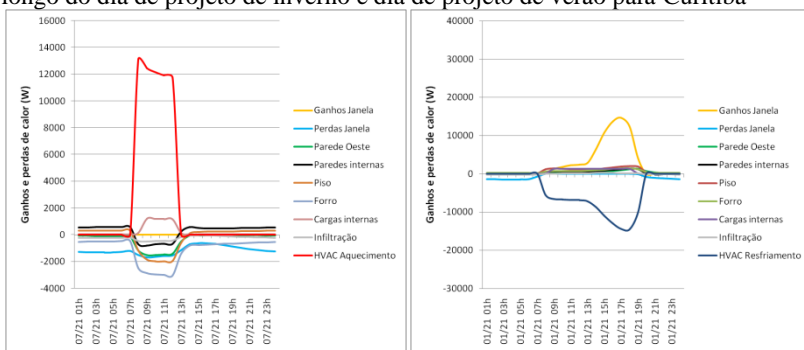
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura A.5. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-2 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Florianópolis



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura A.6. Análise diária de ganhos e perdas de calor na envoltória Brasil-2 ao longo do dia de projeto de inverno e dia de projeto de verão para Curitiba



Fonte: desenvolvido pelo autor.