



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – ECV

**ESTIMATIVA DA CARGA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS  
CONDICIONADOS ARTIFICIALMENTE:  
ENERGYPLUS *versus* METAMODELO**

Acadêmica: Helena Aviz da Costa Pereira

Matrícula: 10203738

Florianópolis  
Novembro de 2015

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

Pereira, Helena

ESTIMATIVA DA CARGA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS CONDICIONADOS  
ARTIFICIALMENTE: ENERGYPLUS versus METAMODELO / Helena  
Pereira ; orientador, Roberto Lamberts ; coorientadora,  
Ana Paula Melo. - Florianópolis, SC, 2015.

113 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Carga térmica de resfriamento.  
3. EnergyPlus. 4. Metamodelo. 5. Desempenho energético de  
edifícios condicionados artificialmente. I. Lamberts,  
Roberto. II. Melo, Ana Paula. III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

HELENA AVIZ DA COSTA PEREIRA

**ESTIMATIVA DA CARGA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS  
CONDICIONADOS ARTIFICIALMENTE:  
ENERGYPLUS *versus* METAMODELO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de Engenharia  
Civil da Universidade Federal de Santa  
Catarina como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Engenheira Civil.

Área: Construção Civil  
Orientador: Roberto Lamberts, PhD.

Florianópolis  
Novembro de 2015.

HELENA AVIZ DA COSTA PEREIRA

**ESTIMATIVA DA CARGA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS  
CONDICIONADOS ARTIFICIALMENTE:  
ENERGYPLUS *versus* METAMODELO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como requisito  
parcial para obtenção do título de  
**ENGENHEIRA CIVIL**

Prof. Lia Caetano Bastos - Coordenadora de TCC

Banca Examinadora:



---

Professor Roberto Lamberts, PhD - Orientador



---

Ana Paula Melo, Dra. -Co-orientadora



---

Prof. Enedir Ghisi, PhD

Ao meu querido avô, Laércio de Aviz  
(*in memoriam*), que aqui fez a mais bela  
passagem.

## AGRADECIMENTOS

Aos que merecem meu agradecimento especial, por participarem deste caminho, que é a minha vida.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais por me darem um caminho. À minha mãe, **Maria Cristina de Aviz**, por sempre me encorajar a explorar este caminho. Em quem eu me espelho a cada dia. Todas as minhas conquistas, são nossas. Minha admiração e meu maior agradecimento são voltadas a esta linda guerreira. Meu muito obrigada, impossível de resumir em palavras. Ao meu pai, **Paulo da Costa Pereira Filho**, por todas as lições de vida.

Aos meus irmãos, **Mariana Aviz da Costa Pereira** e **Paulo da Costa Pereira Neto**, por seguirem comigo este caminho desde sempre. Sei que com eles posso contar para o resto da minha vida. À minha irmã, minha admiração por ela é que me conduziu a estar me tornando engenheira civil. Ao meu irmão, que mesmo de longe, fez-se presente no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus avós, **Rosa Dulcelina Lima de Aviz** (Dona Rosinha) e **Laércio Soares de Aviz** (*in memoriam*) por sempre se fazerem presentes no meu crescimento. Muito obrigada por todo o apoio e por priorizarem a minha educação.

Às minhas grandes amigas, **Ana Paula, Bárbara, Carolina, Lais** e **Maria Eugenia**, por dividirem comigo momentos memoráveis do meu caminho. Muito obrigada por toda a parceria.

Ao **Guilherme Pires Sarmiento Só**, por caminhar ao meu lado e dividir comigo planos dos caminhos futuros. Por sempre me incentivar a crescer e vibrar comigo pelas minhas conquistas. Pelos abraços oferecidos durante a elaboração deste trabalho.

Ao **Raphael Barp Garcia**, por todos os ensinamentos durante o curso. Em quem eu me espelho como profissional, pela sua ética e comprometimento.

À minha querida **turma 10.2**, por todos os bons momentos e também por dividir as dificuldades encontradas durante o curso. Grandes amigos e futuros colegas de profissão.

À minha co-orientadora, **Ana Paula Melo**, por quem eu tenho grande admiração. Muito obrigada por me acolher no LabEEE, pela confiança, pela enorme paciência e dedicação oferecida durante a elaboração deste trabalho.

Aos colegas do LabEEE. Em especial, ao **Rogério Versage**, por ter aberto a porta do LabEEE para mim em 2012. Obrigada também por disponibilizar seu método para o desenvolvimento deste trabalho, por todo o suporte e explicações.

Ao meu professor e orientador, **Roberto Lamberts**, por despertar o interesse pela eficiência energética, por ser o grande exemplo na área.

Ao professor **Enedir Ghisi**, por aceitar meu convite para avaliar e contribuir com meu trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento.

## SUMÁRIO

|              |                                                                                                                             |           |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                                      | <b>17</b> |
| 1.1          | JUSTIFICATIVA .....                                                                                                         | 17        |
| 1.2          | OBJETIVOS .....                                                                                                             | 20        |
| <b>1.2.1</b> | <b>Objetivos Gerais .....</b>                                                                                               | <b>20</b> |
| <b>1.2.2</b> | <b>Objetivos Específicos.....</b>                                                                                           | <b>20</b> |
| 1.3          | ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                                                                                 | 20        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                                                          | <b>22</b> |
| 2.1          | REGULAMENTAÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES .....                                                               | 22        |
| 2.2          | REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA<br>ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS, DE SERVIÇOS E PÚBLICOS ..... | 26        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Limitações do método prescritivo do RTQ-C.....</b>                                                                       | <b>28</b> |
| <b>2.2.2</b> | <b>Método proposto por Versage (2015) .....</b>                                                                             | <b>32</b> |
| 2.3          | CARGA TÉRMICA.....                                                                                                          | 37        |
| 2.4          | INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS NO CONSUMO DE ENERGIA<br>ELÉTRICA E NA CARGA TÉRMICA.....                             | 39        |
| <b>3</b>     | <b>MÉTODO .....</b>                                                                                                         | <b>47</b> |
| 3.1          | TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO .....                                                                                               | 47        |
| 3.2          | ANÁLISE DAS CONSIDERAÇÕES ADOTADAS POR VERSAGE (2015) .....                                                                 | 50        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Influência ao simular zonas térmicas individualmente .....</b>                                                           | <b>51</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Influência das paredes internas adiabáticas .....</b>                                                                    | <b>53</b> |
| 3.3          | APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO POR VERSAGE (2015) .....                                                                       | 54        |
| 3.4          | ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS .....                                                                                   | 56        |
| <b>3.4.1</b> | <b>Variação da construção da parede externa.....</b>                                                                        | <b>57</b> |
| <b>3.4.2</b> | <b>Variação da construção da cobertura .....</b>                                                                            | <b>58</b> |
| <b>3.4.3</b> | <b>Variação dos percentuais de abertura.....</b>                                                                            | <b>59</b> |
| <b>3.4.4</b> | <b>A modelagem do vidro .....</b>                                                                                           | <b>60</b> |
| <b>3.4.5</b> | <b>Variação da carga térmica interna .....</b>                                                                              | <b>61</b> |
| <b>3.4.6</b> | <b>Variação da massa térmica interna .....</b>                                                                              | <b>62</b> |
| <b>3.4.7</b> | <b>Construção das paredes internas .....</b>                                                                                | <b>64</b> |
| <b>3.4.8</b> | <b>Número de pavimentos .....</b>                                                                                           | <b>64</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS .....</b>                                                                                                     | <b>66</b> |

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO METAMODELO ..... | 66         |
| 4.1.1 Influência ao simular zonas térmicas individualmente .....                   | 66         |
| 4.1.2 Influência das paredes internas adiabáticas .....                            | 68         |
| 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO POR VERSAGE (2015) .....                          | 70         |
| 4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS .....                                      | 72         |
| 4.3.1 Variação da construção da parede externa.....                                | 72         |
| 4.3.2 Variação da construção da cobertura .....                                    | 75         |
| 4.3.3 Variação dos percentuais de abertura das fachadas.....                       | 78         |
| 4.3.4 A modelagem dos vidros.....                                                  | 82         |
| 4.3.5 Variação das cargas térmicas internas.....                                   | 85         |
| 4.3.6 Variação da massa térmica interna .....                                      | 91         |
| 4.3.7 Construção das paredes internas .....                                        | 92         |
| 4.3.8 Número de pavimentos .....                                                   | 94         |
| 4.3.9 Considerações finais.....                                                    | 96         |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>                                                            | <b>101</b> |
| 5.1 LIMITAÇÕES .....                                                               | 104        |
| 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                     | 104        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                           | <b>105</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Representação da zona térmica.....                                                | 33 |
| Figura 2: Representação do modelo de simulação .....                                        | 36 |
| Figura 3: Transferência de calor por condução .....                                         | 38 |
| Figura 4: Balanço térmico em uma superfície opaca .....                                     | 39 |
| Figura 5- Condições de contorno dos pavimentos.....                                         | 52 |
| Figura 6- Simulação da edificação completa <i>versus</i> simulação das zonas térmicas ..... | 52 |
| Figura 7: Método simplificado para modelagem de vidros.....                                 | 61 |
| Figura 8: Método detalhado para modelagem de vidros .....                                   | 61 |
| Figura 9 – Representação das divisórias no interior das zonas térmicas.....                 | 63 |
| Figura 10 - Edificação com 1 pavimento e com 15 pavimentos .....                            | 64 |
| Figura 11- - Influência dos parâmetros na variação da carga térmica.....                    | 98 |
| Figura 12 - Relação entre a diferença entre metamodelo e simulação e a carga térmica .....  | 99 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2-1- Parâmetros construtivos utilizados no Método de Versage. ....                                                                                                              | 34 |
| Tabela 3-1 – Quadro de áreas de cada zona térmica .....                                                                                                                                | 47 |
| Tabela 3-2 - Características da edificação modelo .....                                                                                                                                | 49 |
| Tabela 3-3– Dados de entrada do pavimento térreo, tipo e cobertura de zonas perimetrais ....                                                                                           | 55 |
| Tabela 3-4- Variações realizadas nas paredes externas.....                                                                                                                             | 58 |
| Tabela 3-5 – Cargas térmicas internas em cada zona térmica .....                                                                                                                       | 62 |
| Tabela 3-6: Parâmetros variados .....                                                                                                                                                  | 65 |
| Tabela 4-1: Comparação dos resultados de carga térmica de cada zona térmica obtidos por meio de simulação quando realizada no edifício e nas zonas térmicas individualmente. ....      | 66 |
| Tabela 4-2: Comparação dos resultados de carga térmica de resfriamento com simulação completa de uma edificação térrea .....                                                           | 67 |
| Tabela 4-3: Influência das paredes internas adiabáticas para a edificação térrea .....                                                                                                 | 68 |
| Tabela 4-4: Influência em considerar as paredes internas adiabáticas para uma edificação de cinco pavimento.....                                                                       | 69 |
| Tabela 4-5- Comparação entre os resultados obtidos por meio do <i>EnergyPlus</i> e metamodelo por zona térmica.....                                                                    | 71 |
| Tabela 4-6- Comparação entre os resultados obtidos por meio do <i>EnergyPlus</i> e metamodelo por pavimento .....                                                                      | 71 |
| Tabela 4-7: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com parede de tijolo e alta absorvância – Alternativa 1 .....                          | 72 |
| Tabela 4-8: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com parede de tijolo e baixa absorvância solar – Alternativa 2. ....                   | 73 |
| Tabela 4-9: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com parede de concreto e alta transmitância e absorvância solar - Alternativa 3.....   | 74 |
| Tabela 4-10- Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com cobertura de telha de barro e alta absorvância solar – Alternativa 4.....         | 76 |
| Tabela 4-11: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com cobertura de telha de fibrocimento e baixa absorvância solar – Alternativa 5..... | 77 |
| Tabela 4-12: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com WWR=25% - Alternativa 6 .....                                                     | 79 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 4-13: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com WWR=75% - Alternativa 7 .....                  | 80 |
| Tabela 4-14: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com WWR=50% nas fachadas norte e sul .....         | 81 |
| Tabela 4-15: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com WWR=50% nas fachadas leste e oeste .....       | 82 |
| Tabela 4-16: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com vidro simples.....                             | 83 |
| Tabela 4-17: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a alternativa com vidro duplo.....                               | 84 |
| Tabela 4-18: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para densidade de ocupação .....                                      | 85 |
| Tabela 4-19: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para densidade de carga de iluminação .....                           | 86 |
| Tabela 4-20: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a zona central sem carga interna.....                            | 87 |
| Tabela 4-21: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo para a zona central com alta densidade de carga de equipamentos ..... | 88 |
| Tabela 4-22: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo com o aumento da DPE.....                                             | 89 |
| Tabela 4-23: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo com DPE diferente para cada zona térmica .....                        | 90 |
| Tabela 4-24: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo ao considerar massa térmica interna .....                             | 92 |
| Tabela 4-25: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo com parede internas de gesso e não adiabáticas .....                  | 93 |
| Tabela 4-26: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo com as paredes internas de tijolo e não adiabáticas .....             | 94 |
| Tabela 4-27: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo na edificação com um pavimento .....                                  | 95 |
| Tabela 4-28: Comparação entre os resultados do <i>EnergyPlus</i> e Metamodelo na edificação com quinze pavimentos .....                             | 95 |
| Tabela 4-29 – Resultados da variação dos parâmetros alterados no trabalho .....                                                                     | 97 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                                  |                                                                                    |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><math>\alpha_{Cob}</math></b> | Absortância solar da cobertura                                                     |
| <b><math>\alpha_{Par}</math></b> | Absortância solar da parede externa                                                |
| <b>CTcob</b>                     | Capacidade térmica da cobertura                                                    |
| <b>CTpar</b>                     | Capacidade térmica da parede externa                                               |
| <b>DP</b>                        | Densidade de pessoas                                                               |
| <b>DPE</b>                       | Densidade de equipamentos                                                          |
| <b>DPI</b>                       | Densidade de iluminação                                                            |
| <b>FS</b>                        | Fator solar                                                                        |
| <b>MT</b>                        | Massa térmica                                                                      |
| <b>Nº Pav.</b>                   | Número de pavimentos                                                               |
| <b>Par Int</b>                   | Parede interna                                                                     |
| <b>RTQ-C</b>                     | Regulamento técnico da qualidade de edificações comerciais, de serviços e públicas |
| <b>RTQ-R</b>                     | Regulamento técnico da qualidade de edificações residenciais                       |
| <b>Ucob</b>                      | Transmitância térmica da cobertura                                                 |
| <b>UFSC</b>                      | Universidade Federal de Santa Catarina                                             |
| <b>Upar</b>                      | Transmitância térmica da parede externa                                            |
| <b>Uvidro</b>                    | Transmitância térmica do vidro                                                     |
| <b>WWR</b>                       | Window Wall Ratio                                                                  |

## RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é analisar a precisão do metamodelo proposto por Versage (2015). Este método tem o intuito de prever o valor de carga térmica de resfriamento de uma zona térmica, sendo possível avaliar a eficiência energética da edificação completa por meio da ponderação dos valores. A análise foi realizada com base nos resultados de um modelo de referência, sendo este um edifício comercial de escritório de médio porte, com cinco pavimentos. As características adotadas pertencem à base de dados elaborada no desenvolvimento do metamodelo. O fato de cada zona térmica ser simulada individualmente foi analisado com base nos resultados da simulação do edifício de referência completo. Outra consideração analisada foi em relação às paredes interna. Posteriormente, foi avaliada a aplicação do metamodelo baseando-se nos resultados obtidos por meio da simulação computacional, no edifício de referência com as características pertencentes ao banco de dados. O comportamento do resultado de carga térmica também foi observado diante da alteração das características do edifício de referência, utilizando valores não pertencentes ao banco de dados. Os parâmetros analisados foram: absorvância solar e transmitância térmica das paredes e cobertura, WWR, densidade de carga interna (ocupação, iluminação e equipamentos), massa térmica interna e modelagem dos vidros. Em relação à edificação simulada com todas as zonas térmicas, a edificação onde as zonas térmicas foram simuladas individualmente obteve a diferença de 0,07%. Ao simular o edifício de referência com as paredes não-adiabáticas, obteve-se o resultado de carga térmica 1,78% superior ao resultado obtido considerando as paredes internas adiabáticas. Portanto, ambas as considerações impostas no desenvolvimento do metamodelo forneceram resultados satisfatórios. A diferença calculada entre os resultados de carga térmica de resfriamento do edifício de referência obtidos por meio da simulação e por meio da aplicação do metamodelo foi de 4,31%. As maiores diferenças entre a aplicação do metamodelo e da simulação computacional foram observadas na alternativa onde não foi inserida carga térmica interna na zona central, e na alternativa onde foi inserido o objeto de massa térmica interna. Também se observou imprecisão nas alternativas com grandes aberturas de fachada, assim como nas alternativas com diferentes construções de cobertura. Conclui-se que, na maioria das alternativas, foi observada precisão dos resultados obtidos por meio da aplicação do metamodelo em relação aos resultados simulados.

Palavras-chave: Carga térmica de resfriamento. Desempenho energético de edifícios comerciais. Metamodelo. *EnergyPlus*.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A aplicação do conceito de sustentabilidade na construção civil vem modificando o conceito de construir. O objetivo é promover a eficiência energética, a qual, segundo Lamberts *et al.* (2011), significa proporcionar as condições ambientais de conforto térmico aos usuários despendendo o mínimo possível de energia elétrica. Desta forma, estudos vêm sendo realizados com o intuito de aplicar estratégias bioclimáticas com a finalidade de aproveitar as condições naturais do ambiente.

Maiores níveis de eficiência energética podem ser alcançados por meio de estratégias de projeto. Os usuários também têm participação no uso de edifícios eficientes pois, por meio dos seus hábitos, podem reduzir de forma significativa o consumo de energia, aumentando assim a eficiência das edificações e reduzindo desperdícios.

A preocupação com a eficiência energética em edificações evidenciou-se a partir da primeira crise do petróleo, em 1973. Percebeu-se a necessidade de diversificar a matriz energética para suprir a alta demanda de energia elétrica, uma vez que as fontes não são ilimitadas e encontravam-se em escassez, trazendo como consequência o alto custo da energia elétrica. Além disso, os recursos fósseis, por gerarem impactos ambientais, alertaram o mundo quanto à necessidade de criar medidas para a utilização racional dos recursos energéticos e diminuir a emissão de gases do efeito estufa, prejudiciais à camada de ozônio.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2015) o consumo de energia elétrica nas edificações residenciais e comerciais, de serviços e públicas no Brasil corresponde a aproximadamente 15% do total da eletricidade consumida no país. Programas de certificação voltados para edificações surgiram no início dos anos 90, como meio essencial para promover a eficiência energética, por permitir maior transparência no que diz respeito ao uso de energia elétrica nas edificações e, conseqüentemente, minimizar o consumo de energia elétrica (LOMBARD, 2009).

As normas vigentes no mundo possuem metodologias semelhantes quanto à avaliação da envoltória, do sistema de iluminação e do condicionamento de ar. Porém, segundo Santos e Souza (2008), isto não significa que o sucesso do método de avaliação de eficiência energética em um país torna possível sua exportação para outros países, uma vez que alguns fatores como

latitude, condições sociais, econômicas e ambientais influenciam em cada território de maneira singular.

Até o ano de 2001 não havia lei ou norma de eficiência energética em edificações no Brasil. Após um racionamento de energia, surgiu a primeira lei referente à eficiência energética: a Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001a), que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e foi regulamentada pelo Decreto nº 4.059 de 19 de dezembro de 2001 (BRASIL, 2001b). A lei estabelece níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética com base em indicadores técnicos e regulamentação específica. Como parte do incentivo, o Plano Brasileiro de Etiquetagem (PBE, 2015), já existente para aparelhos elétricos, foi ampliado para a certificação energética em edifícios visando estimular o emprego de técnicas de projeto e estratégias bioclimáticas, auxiliando a criação de soluções arquitetônicas mais adequadas ao ambiente climático em que estão inseridas.

Após anos de estudos e discussões entre áreas, foram desenvolvidos os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C, 2009) e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R, 2010). Segundo Silva et al. (2009), a plena implementação da regulamentação pode significar uma grande melhoria na eficiência energética das edificações. Isto tende a levar à valorização das edificações que atenderem aos requisitos, tornando-se um parâmetro importante a ser considerado no momento da compra e arrendamento de uma habitação, tão importante quanto a sua localização, área e outras de suas características. Assim, é recomendado que as edificações já existentes satisfaçam igualmente o novo regulamento.

É importante ressaltar que a aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) não implica em padronização na arquitetura, tampouco em perda da criatividade projetual, pois a adoção de estratégias bioclimáticas não limitam as dimensões de outros aspectos da arquitetura.

O RTQ-C visa a etiquetagem de edificações no Brasil baseando-se em três requisitos: eficiência e potência instalada do sistema de iluminação; eficiência do sistema de condicionamento de ar e desempenho térmico da envoltória da edificação, quando esta for condicionada artificialmente. Existem dois métodos para a avaliação do nível final de eficiência da edificação: o Método Prescritivo, o qual se baseia em equações de regressão linear múltipla; e o Método de Simulação, por meio da utilização de um programa de simulação computacional.

Com a simulação computacional, projetistas podem prever alternativas construtivas a fim de tornar a edificação o mais eficiente possível, testando alterar diversos parâmetros de

entrada. Uma análise deste nível requer, portanto, um conhecimento multidisciplinar devido à grande quantidade de dados de entrada e da complexidade dos fenômenos físicos envolvidos no comportamento térmico das edificações.

Por outro lado, o método prescritivo abrange poucos dados de entradas e algumas suposições, o que causa incertezas nos resultados obtidos e, conseqüentemente, compromete o processo de certificação. Os modelos de predição dos sistemas de etiquetagem brasileiro presentes no RTQ-C foram temas de diversas pesquisas acadêmicas no Brasil para analisar sua precisão e limitações em relação aos resultados obtidos pelo método detalhado de simulação (CARLO, 2008; CARLO e LAMBERTS, 2010; PEREIRA *et al.*, 2010; LEDER e LIMA, 2010; PEDRINI *et al.*, 2010; LAMBERTS e FOSSATI, 2010; YAMAKAWA e WESTPHAL, 2011; RIBEIRO e CARLO, 2011; MELO *et al.*, 2011; MELO *et al.*, 2014). As principais limitações encontradas dizem respeito a não considerar a influência da área envidraçada, assim como das proteções solares de acordo com a orientação solar da fachada, considerar apenas o condicionamento de ar do tipo *Split*, não responder bem à aplicação de vidros de alta performance, não considerar a influência de ventilação e iluminação natural e foram citadas também limitações volumétricas (FOSSATI, 2010; LAMBERTS, 2010; MELO *et al.*, 2014; CARLO, 2008).

Diante dessas e outras limitações da aplicação do método prescritivo observadas no RTQ-C, ressaltou-se a necessidade de determinar um modelo matemático para representar o comportamento térmico de uma edificação com o objetivo de aprimorar o modelo de avaliação da envoltória de edificações comerciais.

Desta forma, Versage (2015) desenvolveu um metamodelo com a finalidade de reduzir a complexidade do atual método prescritivo presente no RTQ-C sem perder detalhes importantes para sua descrição. O método consiste em dividir a edificação em zonas térmicas interiores e perimetrais, com áreas de mesma densidade de cargas térmicas internas (pessoas, equipamentos e iluminação). Por meio do metamodelo, a predição de cargas térmicas é avaliada para cada zona térmica individualmente, de acordo com a recomendação do apêndice G da ASHRAE 90.1.

Os metamodelos são desenvolvidos por métodos estatísticos com o intuito de elaborar uma amostragem a partir de um banco de dados condizente com a realidade. Porém, a impossibilidade de abranger todas as possíveis formas construtivas, levam à incerteza do método simplificado proposto. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a precisão do método proposto por Versage (2015), por meio da aplicação do método e posterior comparação com resultados condizentes com a realidade, obtidos por meio de simulação computacional.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a precisão do metamodelo elaborado por Versage (2015), por meio da comparação dos resultados de cargas térmicas de resfriamento da edificação obtidas por simulação computacional.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Através do desenvolvimento da análise proposta, percebe-se a necessidade de enumeração de alguns objetivos específicos, quais sejam:

- Verificar os resultados adquiridos ao simular individualmente as zonas térmicas pertencentes a uma edificação, de acordo com o método proposto por Versage (2015);
- Analisar a influência de considerar adiabáticas as superfícies da edificação;
- Analisar a consequência nos resultados de carga térmica de resfriamento em cada zona térmica do metamodelo (VERSAGE, 2015) frente a combinações de diferentes parâmetros, como: densidade da potência de equipamentos, densidade da potência de iluminação, densidade de ocupação, percentual de abertura das fachada, orientação das aberturas da fachada, fator solar do vidro, transmitância térmica do vidro, transmitância térmica da cobertura, capacitância térmica da cobertura, absorptância solar da cobertura, transmitância térmica das paredes externas, capacitância térmica das paredes externas, absorptância solar das paredes externas, massa térmica interna, tipos de parede interna, paredes internas adiabáticas e não adiabáticas e o número de pavimentos.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

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

O segundo capítulo consiste em uma revisão da literatura sobre o assunto do trabalho. Os temas abordados neste capítulo basicamente envolvem regulamentações de eficiência

energética em edificações, carga térmica e influência de parâmetros construtivos no consumo de energia elétrica.

O terceiro capítulo apresenta o método utilizado para avaliar a precisão das considerações adotadas para o desenvolvimento do metamodelo, assim como a precisão da aplicação do metamodelo em relação à simulação computacional.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos a partir de comparações com resultados de simulação computacional dos casos apresentados no método.

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

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 REGULAMENTAÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Eficiência energética é um conceito cada vez mais recorrente no debate especializado de engenheiros, técnicos e cientistas, bem como na esfera política e jornalística, nacional e internacional, que acabam por disseminar o termo para a sociedade como um todo. O conceito, entendido em sua forma mais ampla, basicamente diz respeito às estratégias para reduzir o consumo de energia elétrica em edificações, garantindo a seus ocupantes o mesmo nível de conforto térmico, lumínico e acústico que poderiam obter em edificações “menos eficientes”. Este conceito de eficiência nas atividades vem ganhando espaço devido ao processo de globalização e competitividade das empresas.

As primeiras iniciativas do governo para diminuir o consumo energético dos edifícios foram tomadas ainda na década de 70. Diversos países, desde então, vêm discutindo estratégias para implementar a eficiência energética em edificações através de regulamentações para reduzir o consumo de energia elétrica.

A sustentabilidade, vista como um dos maiores desafios do século XXI, passou a contar com instrumentos para contribuir com um satisfatório desempenho energético. Muitos países passaram a dar relevância ao tema e desenvolveram normas de eficiência energética. A demanda crescente de certificações e selos sustentáveis, como o LEED, AQUA e BREEAM visam transparecer a preocupação com a sustentabilidade. Pérez-Lombard *et al.* (2009) consideram a certificação uma tarefa complexa, uma vez que exige a definição de índices de desempenho energético e dos limites para os níveis de eficiência, desenvolvimento de ferramentas e definição do meio de avaliar.

De acordo com Silva (2003), o sucesso da implementação do método de avaliação no país de origem não deve ser considerado como base para ser importado por outros países, uma vez que alguns aspectos perdem validade, assim como outros importantes deixam de ser considerados. Para os padrões brasileiros, por exemplo, alguns itens incluídos em determinados métodos podem demandar muitos detalhes, considerados desnecessários.

Devem-se criar oportunidades e incentivar usuários e projetistas a terem acesso a dispositivos e tecnologias visando transparecer o uso final da energia elétrica. Uma vez que

estas medidas se tornem práticas comuns, gradualmente será notada uma redução no consumo de energia elétrica.

Os Estados Unidos foram os pioneiros no desenvolvimento de códigos em eficiência energética nas Américas. A norma americana ASHRAE 90.1 - *Energy Standard for Buildings Except Low Rise Residential Buildings* lançada em 1989 serviu como embasamento para a norma de diversos outros países (ASHRAE *Standard*, 1989). A ASHRAE 90.1 sofre revisão a cada três anos e a última versão disponível é do ano de 2013 (ASHRAE *Standard*, 2013). A avaliação pode ser feita através do método prescritivo, método de compensação (*trade off*) e o “*Energy Cost Budget*”. Existem algumas limitações no método prescritivo, quanto a alguns aspectos construtivos, como a transmitância e resistência térmica de seus componentes, a orientação solar das fachadas e o fator solar do vidro. No método da compensação, alguns limites podem ser ultrapassados, porém, devem ser compensados pela incorporação de limites mais restritivos em outras soluções. Por último, o *Energy Cost Budget* realiza uma comparação entre o consumo de energia de um modelo real e de um modelo de referência por meio do uso de simulação computacional.

Além de alguns estados dos Estados Unidos que adotam a ASHRAE *Standard* 90.1, outros desenvolveram sua própria regulamentação, como é o caso da Califórnia com o código *Title 24 (California Energy Commission, 2001)*, lançada em 1978. O código é de caráter obrigatório, devendo a edificação atender os requisitos mínimos quanto a envoltória, sistema de aquecimento de água, de condicionamento de ar e iluminação. O método de avaliação do sistema térmico da edificação compara o desempenho da edificação real com o de uma edificação similar com características que atendam ao método prescritivo através de cálculos ou simulação computacional. O método prescritivo pode limitar valores de resistência térmica, transmitância térmica e fator solar dos materiais ou componentes, dependendo da orientação da edificação em análise e dos componentes construtivos.

O sistema LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), cuja avaliação de energia é baseada nos requisitos do Apêndice G da ASHRAE *Standard* 90.1, foi desenvolvido pelos Estados Unidos no ano de 1996. É uma certificação conhecida internacionalmente, que tem como propósito a orientação e mensuração de edificações mais sustentáveis a partir de requisitos mínimos definidos, e analisados também ao longo da utilização do edifício. Cada um desses requisitos é pontuado e, ao final, um cálculo define o grau de eficiência da edificação, em uma tentativa de considerar os requisitos essenciais para enquadrar-se como “selo verde”.

No Japão, foi promulgada, em 1979, a lei que diz respeito ao uso racional de energia em edifícios. A norma *Criteria for Clients on the Rationalization of Energy Use for Buildings*

(CCREUB), a qual oferece diretrizes para a prevenção da perda de calor, por meio da recomendação do melhor material a ser utilizado em paredes e janelas, por exemplo. Enfatiza também, questões quanto à eficiência do sistema de condicionamento de ar, ventiladores, sistemas de aquecimento de água, entre outros. Todas estas medidas são obrigatórias para edifícios em reforma, ampliação ou construção, sendo que para a aprovação de tal obra é necessário apresentar um relatório das medidas que serão tomadas para a economia, assim como relatórios periódicos sobre a manutenção de tais medidas após a obra ser concluída. A avaliação através da norma CCREUB é baseada em dois indicadores. Um deles é para o envelope da edificação, denominado *Perimeter Annual Load* (PAL). O outro indicador é adotado para os equipamentos, denominado *Coefficient of Energy Consumption* (CEC). A regulamentação para edifícios comerciais vigente no Japão desde 2005 é de caráter voluntário e, de acordo com Santos e Souza (2008), a conformidade com a norma subiu de 34% para 74% em 5 anos de regulamentação. O Japão adotou também como iniciativa, o sistema CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*), o qual tem como objetivo classificar o desempenho dos edifícios verdes. A comparação da qualidade e desempenho do edifício em relação ao impacto energético, ambiental, de uso de materiais e recursos permite a classificação do mesmo entre cinco níveis de eficiência. Para a obtenção do resultado, são observados 22 indicadores, dentre eles o conforto térmico, carga térmica, iluminação, uso de energia natural, eficiência de sua operação, durabilidade do edifício, entre outros.

Na Austrália, cada estado e território possui suas regulamentações próprias, as quais possuem como referência o *Building Code of Australia* (BCA). Este código oferece diretrizes para a construção de acordo com a zona bioclimática da Austrália. A avaliação pode ser realizada tanto pelo método prescritivo quanto pela comparação com um edifício de referência. (*Australian Building Code, 2008*).

Segundo o *Office of the Australian Building Codes* (2000), no caso do Reino Unido, a eficiência energética passou a fazer parte da regulamentação a partir de 1974. Em 1991, o foco da regulamentação dedicou-se aos edifícios, buscando minimizar a perda de calor através de controle e eficiência dos sistemas de iluminação, condicionamento de ar e aquecimento de água. No caso dos edifícios não-residenciais o regulamento oferece três métodos para verificar a conformidade do edifício em relação ao documento. O método elementar limita os valores de transmitância térmica dos elementos construtivos, além de valores máximos para o percentual de abertura da fachada. Os dois outros métodos, o método de cálculo assim como o método de uso da energia, comparam a perda de calor do edifício proposto com a do edifício de referência

com mesmas proporções, mas com alterações nas características construtivas. Porém, o último método diferencia-se por incluir ganhos de calor solar e o calor interno nos cálculos.

Também desenvolvido no Reino Unido, o BREEAM – *Building Establishment Environmentl Assesment Method* é considerado o primeiro e mais conhecido sistema de avaliação de desempenho térmico. A certificação se dá por meio da verificação do cumprimento de requisitos mínimos de desempenho, projeto e operação do edifício. De acordo com o número de itens cumpridos, um índice é calculado e classificado em uma das classes de desempenho do BREEAM, permitindo-se assim a comparação com outros edifícios certificados pelo sistema.

No ano de 2010, as regulamentações de eficiência energética em edificações vigentes nos países da Europa foram revisadas para atender aos requisitos de sustentabilidade de acordo com o *European Directive on the Energy Performance of Buildings* (EU Official Journal, 2010). Este requisito apresenta diretrizes para reduzir a dependência de gás e petróleo assim como reduzir a emissão de gases responsáveis por acentuar o efeito estufa.

Em Portugal, o novo regulamento térmico foi implementado em abril de 2006. A legislação portuguesa apresenta duas diferentes regulamentações para desenvolver a sustentabilidade no setor da construção: o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006) voltado para edifícios residenciais e o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RSECE, 2006) para edifícios de escritórios artificialmente condicionados. Uma estratégia presente nas regulamentações europeias é a implementação de envoltórias exteriores cada vez mais bem isoladas. A recomendação é duplicar as espessuras de isolamento das paredes e coberturas para garantir coeficientes de transmissão térmica de 40% inferior a atuais. Adotar vidros duplos nas zonas climáticas mais frias e nas orientações sem significativos ganhos de calor por radiação também é uma estratégia presente nestas regulamentações. Porém, um estudo realizado por Chvatal (2009) demonstra a eficiência deste sistema no inverno, pois quanto menor for o coeficiente de transmissão térmica, menores serão as perdas pela envoltória, por outro lado no verão pode causar superaquecimento e conseqüentemente aumento na demanda de condicionamento de ar.

## 2.2 REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS, DE SERVIÇOS E PÚBLICOS

A eficiência energética tomou nova dimensão no Brasil após a crise de abastecimento de energia elétrica de 2001. Novos hábitos tiveram que ser adotados pela população após o risco do corte de energia elétrica em todo o país ser considerado. A crise energética estava ligada principalmente à falta de planejamento no setor e à ausência de investimentos em geração e distribuição de energia. Somou-se a isso, o aumento contínuo do consumo de energia graças ao crescimento populacional e ao aumento de produção pelas indústrias. Outro fator que contribuiu para agravar a situação foi o fato de que mais de 90% da energia elétrica do Brasil era produzida por usinas hidrelétricas, que necessitam de chuva para manter o nível adequado de seus reservatórios para a geração de energia.

No Brasil, os Requisitos Técnicos da Qualidade para o nível de eficiência energética em edifícios comerciais, de serviço e públicos (RTQ-C), publicado em 2009 (BRASIL, 2009) e o para edifícios residenciais (RTQ-R), em 2010, foram desenvolvidos com o objetivo de etiquetagem das edificações brasileiras, tornando-as mais eficientes energeticamente (BRASIL, 2010).

O RTQ-C apresenta dois métodos para a avaliação do nível final de eficiência da edificação: Método Prescritivo, que se refere a uma equação onde são atribuídos pesos a cada requisito; ou através do Método de Simulação, que adota a utilização de um programa de simulação computacional. O método prescritivo consiste no uso de equações e parâmetros pré-definidos, enquanto que o método de simulação permite mais flexibilidade na concepção dos edifícios, mesmo sendo definidos alguns parâmetros para modelagem. Segundo Carlo e Lamberts (2010), o método de simulação é mais completo para qualquer análise do desempenho energético do edifício, por proporcionar flexibilidade no processo de projeto.

Para o desenvolvimento do método prescritivo do RTQ-C, Carlo (2008) desenvolveu equações de regressão linear múltipla para prever o consumo de energia de edificações comerciais no Brasil. Foram observados 1.103 edifícios comerciais distribuídos em cinco cidade brasileiras. Nestas edificações foram observadas características da envoltória como área de janela, tipo de vidro, existência de dimensões de proteções solares, proporção das menores fachadas em relação às maiores, número de pavimentos e forma. Foram selecionadas três atividades para formar cinco modelos representativos: grandes e pequenos escritórios, grandes

e pequenas lojas e hotéis. Um sexto modelo foi desenvolvido para representar edifícios com mais de um pavimento. Algumas características foram estabelecidas para possibilitar o desenvolvimento do método, assim, as quatro fachadas passaram a ter o mesmo percentual de abertura, o mesmo tipo de ar-condicionado e as maiores fachadas passaram a ser voltadas para orientações opostas.

Assim, foram elaboradas duas equações baseadas na área de projeção da edificação (uma menor do que 500m<sup>2</sup> e outra maior que 500m<sup>2</sup>) em diferentes zonas bioclimáticas. Os resultados dessas equações não demonstram o consumo de energia elétrica da edificação, mas um Indicador de Consumo da envoltória.

Os protótipos foram simulados por meio do programa *EnergyPlus*, sendo executado duas vezes. A primeira vez focou em características que influenciam no consumo de energia elétrica, tais como densidade de carga interna, orientação solar da edificação, a eficiência do sistema de ar-condicionado e a volumetria. Com os resultados, percebeu-se grande influência da volumetria no consumo de energia. A segunda simulação teve como enfoque a envoltória. Com os resultados, foi possível observar que, apesar de a densidade de carga interna e o padrão de uso influenciarem no consumo de energia, não alteram o impacto da envoltória sobre o consumo. Já a volumetria, representada pelo Fator de Forma (razão entre a área da envoltória e o volume total) e Fator de Altura (razão entre a área de projeção da cobertura e a área total de piso do edifício) causa impacto no consumo. Com os resultados de consumo de eletricidade dos protótipos simulados, foram fixados valores para os parâmetros não relacionados com o envelope da edificação a fim de desenvolver uma equação de regressão multivariada que descrevesse o consumo de energia elétrica em função da alteração das características da envoltória. A orientação foi fixada com as maiores fachadas voltas para Norte-Sul e sistema de condicionamento de ar-condicionado com eficiência A, do tipo janela com COP de 3,19 W/W e *setpoint* de 18°C para aquecimento e de 24°C para resfriamento. A densidade de carga interna instalada e padrão de uso foram considerados constantes, com valores de 25 W/m<sup>2</sup> e 11 horas, respectivamente. Além disso, a infiltração varia de 0,5 ACH a 1 ACH.

O método prescritivo define a eficiência geral da edificação através de equações fornecidas pelo RTQ-C. Para cada requisito foi atribuído um peso: 30% para a envoltória, 30% para o sistema de iluminação, e 40% para o sistema de condicionamento de ar.

As equações da envoltória referem-se às aberturas verticais envidraçadas e estão relacionadas à volumetria do edifício. O sistema de iluminação é avaliado comparando-se as densidades de potência de iluminação relativa, a qual representa a densidade de potência de iluminação interna relativa à iluminância, com a densidade de potência de iluminação final,

obtida pelo projeto luminotécnico. A determinação do nível de classificação dos sistemas de condicionamento de ar do tipo de janela e tipo *splits* é simples, uma vez que são aparelhos já etiquetados pelo Inmetro.

### 2.2.1 Limitações do método prescritivo do RTQ-C

A simplicidade do método prescritivo pode apresentar limitantes para descrever características de certos edifícios. Nestes casos recomenda-se a simulação, uma vez que pode ser aplicável a qualquer tipo de edifício, sendo ou não passível pelo método prescritivo. Segundo Carlo (2010), são indicados certamente para a simulação casos com ventilação natural, proteções solares projetadas para algum caso específico, grandes áreas envidraçadas com vidros de elevado desempenho térmico e luminoso, sistemas de ar-condicionado não previstos.

Durante o desenvolvimento do modelo simplificado para a avaliação da envoltória presente no RTQ-C, foram encontradas algumas limitações, uma vez que o uso de regressão linear envolve grande simplificação no modelo estatístico na relação entre a geometria da edificação e a energia consumida.

Carlo (2008) apontou algumas das limitações do modelo simplificado. Durante o desenvolvimento da equação já foi observada a limitação quanto à transmitância térmica, uma vez que este parâmetro não representou relação linear, motivo pelo qual foi necessária sua exclusão da equação. Além disso, foi observada a impossibilidade de as equações representarem diversas variações volumétricas. Volumes muito pequenos, ou muito grandes, ou pouco comuns podem não ser representados pela equação, pois não foi possível considerar, na mesma equação, todas as variações de volumetria analisadas. O modelo também apresenta algumas restrições quanto às características de padrão de carga térmica interna e padrão de uso e ocupação, pelo fato de alguns valores serem necessariamente fixos. Outro fator limitante diz respeito à iluminação natural e ventilação natural, que não são consideradas pela equação. O modelo ainda considera apenas um tipo de sistema de condicionamento de ar, portanto a modelagem torna-se restrita ao uso do *Split*. O fato de a influência do entorno da edificação não ser considerada no modelo também limita a aplicação do método. Limitações quanto as utilizações de vidros de alto desempenho juntamente com grande área de janela também foram observadas.

Pereira *et al.* (2010) analisaram as densidades de potência de iluminação relativas finais para estabelecer o nível de eficiência energética por meio do RTQ-C. Observou-se que, no RTQ-C, o nível de eficiência energética independe da área do ambiente e da quantidade de luminárias instaladas. Portanto, projetos que não atendem a NBR 5413 podem atingir um bom

nível de eficiência, apesar de não respeitarem o valor máximo estabelecido pela norma. Além disso, a aplicação deste método é prejudicada pelo fato de não ser possível avaliar ambientes com diversos tipos de luminárias. Portanto, o método utilizado no RTQ-C pode ser considerado incompatível com a realidade do processo de elaboração de projetos de iluminação. A conclusão foi confirmada pelo estudo de Ribeiro (2011), onde foi realizada uma análise dos parâmetros do RTQ-C comparados às indicações de iluminâncias definidas em projeto (NBR 5413). Os resultados mostraram que a maioria dos ambientes obtiveram nível de classificação inferior por meio do RTQ-C.

Leder e Lima (2010) analisaram a envoltória do prédio administrativo da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) por meio do método prescritivo. A edificação em análise seria classificada como nível C, em razão do elevado percentual de abertura na fachada oeste; a absorvância superior a 0,4 nas superfícies da envoltória e a transmitância da cobertura superior a 1,0 W/m<sup>2</sup>K. Com algumas alterações a edificação teria a possibilidade de atingir o nível A. As soluções encontradas seriam a redução do percentual de abertura da fachada oeste, de 0,52 para a metade; redução da absorvância das superfícies externas da envoltória para um valor inferior a 0,4 por meio da substituição do acabamento externo aparente por uma cor clara, redução da transmitância da cobertura para um valor inferior a 1,0 W/m<sup>2</sup>K, uso de proteção à radiação solar e o favorecimento do uso da ventilação natural. Sendo assim, para a edificação em análise o método da simulação computacional seria o método mais adequado, pois possibilita a análise de soluções alternativas.

O objetivo principal do estudo de Pedrini *et al.* (2010) é demonstrar que mesmo obtendo classificação nível A de acordo com o RTQ-C, envoltórias projetadas com preocupações bioclimáticas podem gerar um consumo energético do edifício inferior a outras sem estas características. Portanto, as simulações demonstram que a classificação da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C pode deixar de contemplar soluções arquitetônicas de comprovada eficiência energética em função das simplificações de análise das variáveis que influenciam o consumo energético por meio da envoltória de edificações.

Lamberts e Fossati (2010) analisaram dez edifícios de escritórios localizados em Florianópolis/SC através do método prescritivo do RTQ-C com ênfase na envoltória. Portanto, foram variados parâmetros como percentual de abertura da fachada, ângulo de sombreamento e fator solar dos vidros. Observou-se que grandes percentuais de abertura na fachada oeste podem comprometer a eficiência da envoltória, portanto, a orientação pode determinar áreas maiores de abertura. Concluiu-se que o percentual de abertura da fachada tem grande influência no indicador de consumo da envoltória, seguido das proteções solares. O fato de a orientação

não ser levada em consideração ao projetar a área envidraçada e as proteções solares, pode influenciar na classificação da eficiência da envoltória. Além disso, deve-se ressaltar que vidros com fatores solares baixos podem contribuir para elevar o nível de eficiência de um edifício, porém, o método prescritivo não respondeu bem à aplicação de vidro de controle solar.

Yamakawa e Westphal (2011) analisaram a influência do fator solar e área de abertura das fachadas por meio dos dois métodos de avaliação do nível de eficiência energética propostos pelo RTQ-C. O método simplificado não demonstrou sucesso quanto ao fator solar, uma vez que apresentaram como resultado baixa classificação de nível de eficiência energética. Segundo o método prescritivo, quanto menor o percentual de abertura das fachadas, melhor o desempenho térmico da edificação. Porém, a influência positiva que vidros de alto desempenho proporcionam não é levado em consideração na análise, confirmando o que foi observado por Lamberts e Fossati (2010). Além disso, observou-se que existem discrepâncias entre os resultados do nível de eficiência para o método prescritivo e o método de simulação.

De acordo com Melo *et al.* (2011), a utilização do modelo simplificado conduziu a menores resultados quanto ao nível de eficiência energética quando comparado com o resultado obtido por meio do método de simulação. Considerando que o modelo simplificado foi desenvolvido a partir de resultados fornecidos pelo programa de simulação computacional, esperavam-se resultados similares nesta comparação. Casos do BESTEST (*Building Energy Simulation Test*) escolhidos de acordo com parâmetros relevantes, foram utilizados para avaliar a exatidão do modelo simplificado do RTQ-C. O BESTEST (ASHRAE *Standard* 140, 2004) consiste em um método para testar e diagnosticar programas de simulação computacional para edificações. Os resultados do modelo simplificado excederam o valor máximo aceitável, possivelmente por causa da geometria adotada, diferente das adotadas no desenvolvimento do modelo simplificado. Observou-se que a variação da geometria adotada é uma limitação do modelo simplificado. Os valores ultrapassaram os limites aceitáveis, pois a geometria do BESTEST não está entre aquelas consideradas no desenvolvimento do modelo simplificado. Portanto, o método simplificado possui a limitação na representação da volumetria da edificação. No estudo observou-se que tipologias com fator de forma inferior ao limite mínimo de 0,15 exigidos pelo RTQ-C conduziu a valores de eficiência energética com grandes diferenças quando comparados com o método de simulação.

O estudo realizado por Santos e Souza (2012) enfoca na influência das proteções solares no desempenho de edifícios. Foram avaliados pelo método prescritivo e pelo método de simulação edificações com e sem brises. Comparando-se os resultados e sabendo que o método prescritivo do RTQ-C considera apenas o ângulo da proteção solar na avaliação, concluiu-se

que a geometria e a orientação de tais dispositivos possuem significativa importância no consumo de energia da edificação.

Melo *et al.* (2014a) observaram que o método estatístico de regressão linear múltipla adotado para o desenvolvimento do modelo simplificado do RTQ-C foi incapaz de representar adequadamente a relação entre os dados de entrada e o consumo de energia para edificações comerciais no Brasil. Com o objetivo de estimar o consumo de energia em edificações comerciais, desenvolveram um modelo simplificado buscando melhorias na precisão das equações de avaliação de edificações comerciais, baseando-se no modelo simplificado para a avaliação da eficiência da envoltória do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Para o desenvolvimento do novo modelo foram considerados 3200 casos, adotando o método estatístico de rede neural, uma vez que este método estatístico apresentou resultados com pouca diferença quando comparados com os resultados fornecidos pelo programa de simulação *EnergyPlus*. Com a finalidade de reduzir o número de casos para tornar a análise viável, mas sem influenciar na qualidade dos resultados, foi aplicado o método de amostragem do hipercubo latino. Aplicando o novo método, foi possível abranger todas as tipologias com diferentes áreas de projeção de cobertura em uma mesma equação. O novo modelo de redes neurais artificiais proposto alcançou melhorias significativas, uma vez que apresentou uma pequena diferença entre o consumo simulado e equacionado para tipologias com não pertencente ao banco de dados.

Melo *et al.* (2014b) realizaram uma comparação entre a ANSI/ASHRAE *Standard* 90.1-2007 de padrão LEED e o RTQ-C em relação ao nível de desempenho de edificações comerciais e residenciais, localizadas em Brasília, Rio de Janeiro e Belém. Os resultados obtidos para as edificações comerciais demonstraram que há uma equivalência entre os níveis A e C através da regulamentação brasileira (RTQ-C) e a ANSI/ASHRAE 90.1 – 2007, dependendo do clima adotado. Para o modelo de referência localizado em Brasília, a equivalência é notada em uma edificação onde o nível de desempenho obtido foi C e em outra edificação onde o nível é B. No Rio de Janeiro, ambas as edificações demonstraram equivalência para o nível B, enquanto que em Belém a equivalência foi notada no nível A. Através da análise de Melo *et al.* (2014b), é possível constatar que há uma maior exigência para obtenção do nível A na classificação das edificações comerciais do Brasil através do RTQ-C em relação aos padrões da ANSI/ASHRAE *Standard*-2007. Para as edificações residenciais, o modelo de referência da ANSI/ASHRAE *Standard* 90.1 – 2007 resultou em valores de consumo de energia elétrica superiores do que o modelo de referência de nível C do regulamento brasileiro (RTQ-R) para todos os climas

analisados. A diferença entre os dois modelos justifica-se pelo sistema de iluminação, uma vez que os valores considerados no regulamento brasileiro são inferiores aos da *ANSI/ASHRAE Standard-2007*.

Frente a estas limitações e com base nos resultados apresentados nos estudos de metamodelos precedentes de CARLO (2008) e MELO (2012), verificou-se a necessidade de determinar um modelo simplificado mais preciso para estabelecer o nível de eficiência energética para edificações comerciais através do RTQ-C. Versage (2015) propôs-se a aprimorar o método prescritivo visando fornecer resultados mais precisos baseado na carga térmica de resfriamento de uma zona térmica.

### **2.2.2 Método proposto por Versage (2015)**

O método proposto por Versage (2015) tem o propósito de analisar a carga térmica interna por zona térmica para a avaliação da eficiência energética da edificação. Segundo Versage (2015), este método é chamado de metamodelo pelo fato de ser um modelo que busca combinar as funcionalidades principais de simulações físicas e de previsões estatísticas, uma vez que estas oferecem agilidade apesar de serem restritas.

A edificação é dividida em zonas térmicas por áreas com mesma densidade de cargas térmicas internas (pessoas, equipamentos e iluminação), e divididas por zonas térmicas interiores e perimetrais. A zona térmica interior é a área localizada a 4,5 metros das fachadas externas, e as zonas perimetrais são as áreas entre as fachadas externas e o limite de 4,5 metros adentro, separadas por orientação (ASHRAE, 2013), conforme demonstrado na Figura 1. Qualquer que seja a geometria da edificação, as zonas térmicas serão consideradas modeladas desta maneira. Caso deseje-se mensurar o desempenho da edificação completa, pavimento ou ambiente será definido pela ponderação das avaliações de suas zonas térmicas. Desta forma, o método tem o poder de prever o desempenho de qualquer zona térmica da edificação.

O método considera somente uma fachada voltada para o exterior, com percentual de abertura da fachada. As demais paredes internas são consideradas em condições adiabáticas.

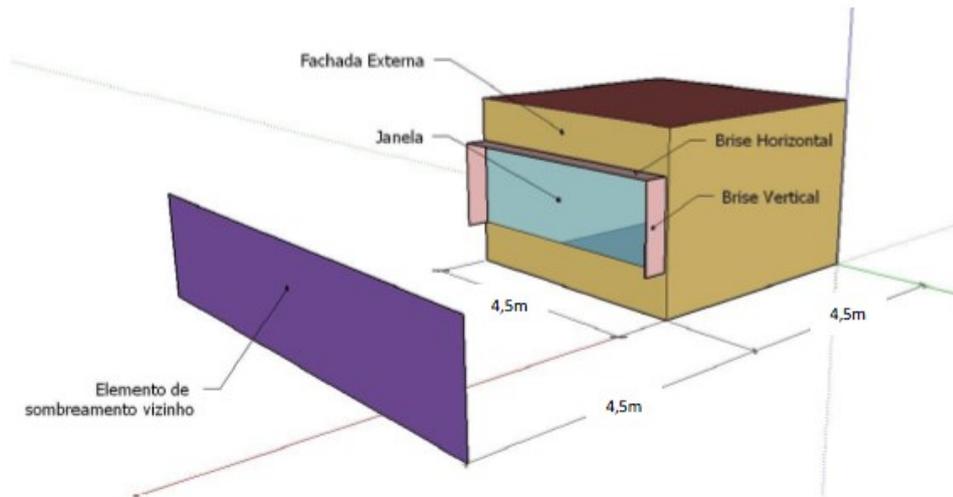


Figura 1- Representação da zona térmica

Fonte: Versage (2015)

Para analisar o comportamento da edificação diante da possibilidade de diferentes cenários, foram alterados parâmetros físicos, geométricos e cargas térmicas internas da zona térmica. Considerou-se, para cada condição, uma abrangência de valores pertencentes a um conjunto com intervalos uniformes para que os metamodelos pudessem representar qualquer combinação possível. Os parâmetros simulados encontram-se na Tabela 2-1.

Dentre os parâmetros térmicos parametrizados, encontram-se a modelagem de paredes, cobertura e vidros. As paredes e cobertura foram consideradas compostos apenas por concreto e isolante térmico, sendo que o último é projetado para o interior para reproduzir o efeito de atraso térmico da massa de concreto.

Quanto à absorvância solar da parede externa e cobertura, ou seja, a fração de calor da radiação solar incidente absorvida pelo material, os valores simulados variaram de 0,2 a 0,8, abrangendo quase todos os valores possíveis de absorvância térmica.

As paredes internas foram consideradas adiabáticas para que a zona térmica pudesse representar qualquer ambiente. Além disso, as paredes internas foram consideradas leves, ou seja, sem massa térmica. Para variar a massa térmica interna na simulação foi utilizada uma parede interna composta de 10 cm de concreto e variando a área da parede entre 2 e 56 m<sup>2</sup>. Assim, as paredes internas podem ser utilizadas para representar desde paredes com massa desprezível, por serem muito leves, até um sistema pesado.

Tabela 2-1- Parâmetros construtivos utilizados no Método de Versage.

Fonte: Versage (2015)

| <b>Parâmetro</b>                                              | <b>Valores</b>                                                              |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Massa térmica interna (m)                                     | 2; 8; 14; 20; 26; 32; 38; 44; 50; 56                                        |
| Transmitância térmica da parede externa (W/m <sup>2</sup> .K) | 0,544; 0,997; 2,997; 0,538; 0,975; 2,781; 5,176; 0,528; 0,943; 2,439; 4,396 |
| Capacidade térmica da parede externa (kJ/m <sup>2</sup> .K)   | 0,22; 88; 220                                                               |
| Absortância solar da parede externa                           | 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8                                           |
| Transmitância térmica da cobertura (W/m <sup>2</sup> .K)      | 0,533; 0,958; 2,654; 0,527; 0,938; 2,503; 4,288; 0,517; 0,909; 2,305; 3,305 |
| Capacidade térmica da cobertura (kJ/m <sup>2</sup> .K)        | 0,22; 88; 220                                                               |
| Absortância solar da cobertura                                | 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8                                           |
| Tipo de piso                                                  | com isolante; sem isolante                                                  |
| Percentual de janela na fachada (%)                           | 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60;70; 80                                            |
| Fator solar do vidro                                          | 0,87; 0,76; 0,65; 0,54; 0,43; 0,32; 0,21                                    |
| Transmitância térmica do vidro (W/m <sup>2</sup> .K)          | 5,7; 2,8; 1,9                                                               |
| Ângulo vertical de sombreamento                               | 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60;70; 80                                            |
| Ângulo horizontal de sombreamento                             | 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60;70; 80                                            |
| Ângulo de obstrução da vizinhança                             | 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60;70; 80                                            |
| Horário de ocupação (horas)                                   | 8; 12; 16; 20; 24                                                           |
| Densidade de potência de iluminação (W/m <sup>2</sup> )       | 4; 8; 12; 16; 24; 28; 32; 36; 40                                            |
| Densidade de potência de equipamentos (W/m <sup>2</sup> )     | 4; 8; 12; 16; 24; 28; 32; 36; 40                                            |
| Densidade de pessoas (pessoas/m <sup>2</sup> )                | 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7                                                |
| Orientação solar                                              | 0; 45; 90; 135; 180; 225; 270; 315                                          |
| Infiltração (ACH)                                             | 0,5; 1,0; 1,5                                                               |
| Pé-direito (m)                                                | 2,6; 3,0; 3,4; 3,8; 4,2; 4,6; 5,0; 5,4; 5,8; 6,2                            |
| Exposição da cobertura                                        | externa, adiabática                                                         |
| Exposição do piso                                             | contato com o solo; adiabática; externa                                     |

Os valores do fator solar do vidro foram adotados para representar desde vidros claros, com fator solar de 0,87, até vidros de controle solar de alto desempenho, com fator solar de 0,21. O valor da transmitância térmica variou de vidros simples (5,7 W/m<sup>2</sup>K), vidros duplos (2,8 W/m<sup>2</sup>K) e vidros triplos ou com camada de baixa emissividade (1,9 W/m<sup>2</sup>K).

Quanto aos parâmetros geométricos, foi parametrizado o percentual de janela na fachada, ou seja, a razão da área envidraçada pela área total de fachada. Os valores adotados variaram de 0% a 80%. O sombreamento das aberturas, através de brises e demais obstruções que bloqueiam a radiação solar incidente nas áreas envidraçadas, permite a redução do ganho de calor. Assim, para a composição do banco de dados, o ângulo vertical de sombreamento e o

ângulo horizontal de sombreamento variaram entre 0 a 80°. Quanto ao pé-direito, os valores variaram entre 2,6 e 6,2 m.

A combinação entre ângulos de sombreamento e orientação solar representa uma gama de soluções que podem ser consideradas representativas no ganho de calor da edificação comercial em estudo. A zona térmica em análise pode ser representada em qualquer orientação solar, visto que os parâmetros adotados para o azimute possuem oito valores que representam a orientação da fachada principal para os quatro pontos cardeais e para os quatro pontos colaterais, variando o ângulo a cada 45°.

Outro fator que influencia no desempenho térmico da edificação é o tipo de exposição do piso e da cobertura considerado. O piso da zona em análise pode estar em contato com o solo, no caso do pavimento térreo, voltado para o exterior, em situações de pilotis, ou ainda em situação adiabática, quando se trata de um pavimento intermediário. Quanto à cobertura da zona térmica, pode ser considerada voltada para o exterior, em coberturas, ou em situações adiabáticas, tratando-se de pavimentos intermediários.

O ganho de calor produzido dentro de cada zona térmica por meio do sistema de iluminação, equipamentos, pessoas e infiltração também foi considerado. O valor de iluminação e equipamentos na zona térmica analisada variou de 4 a 40 W/m<sup>2</sup>.

O ganho térmico pela ocupação de pessoas é dado por calor latente e calor sensível. A fração de calor sensível é dividida entre ganhos de calor radiante, fixados em 30%, e ganhos de calor por convecção, sendo assumido o valor de 70%. O nível de atividade por pessoa foi fixado em 120 W, representando uma atividade média de escritório. Houve variação na densidade de pessoas na zona térmica de 0,1 a 0,7 pessoas/m<sup>2</sup>.

O horário de ocupação e de controle do sistema de iluminação e equipamentos também influencia os ganhos de cargas térmicas internas. Foram considerados horários de 8, 12, 16 e 24 horas de ocupação para os dias de semana, enquanto nos finais de semana não há ocupação.

A infiltração está relacionada com as trocas de calor do ambiente interno, portanto, é importante verificar o fluxo de ar proveniente do ambiente externo, pois representa a renovação do volume de ar da zona térmica. Para a construção da base de dados foram considerados valores entre 0,2 e 1,0 troca de ar por hora.

O conjunto de todos os parâmetros citados anteriormente resultou em uma base de dados com o conjunto de 21 variáveis, com diferentes valores de parâmetros físicos, geométricos e de carga térmica interna. Para representar o universo de casos a serem avaliados para edifícios comerciais, os casos da base de dados foram simulados alterando as possibilidades construtivas e de uso de uma zona térmica de edificação comercial condicionada artificialmente. Para isso,

o modelo simplificado da zona térmica de 4,5 x 4,5 m, representado pela Figura 2, serve como caso base para as simulações. Portanto, o sistema combina os parâmetros e valores especificados sobre o caso base e gera um arquivo de entrada do *EnergyPlus*.

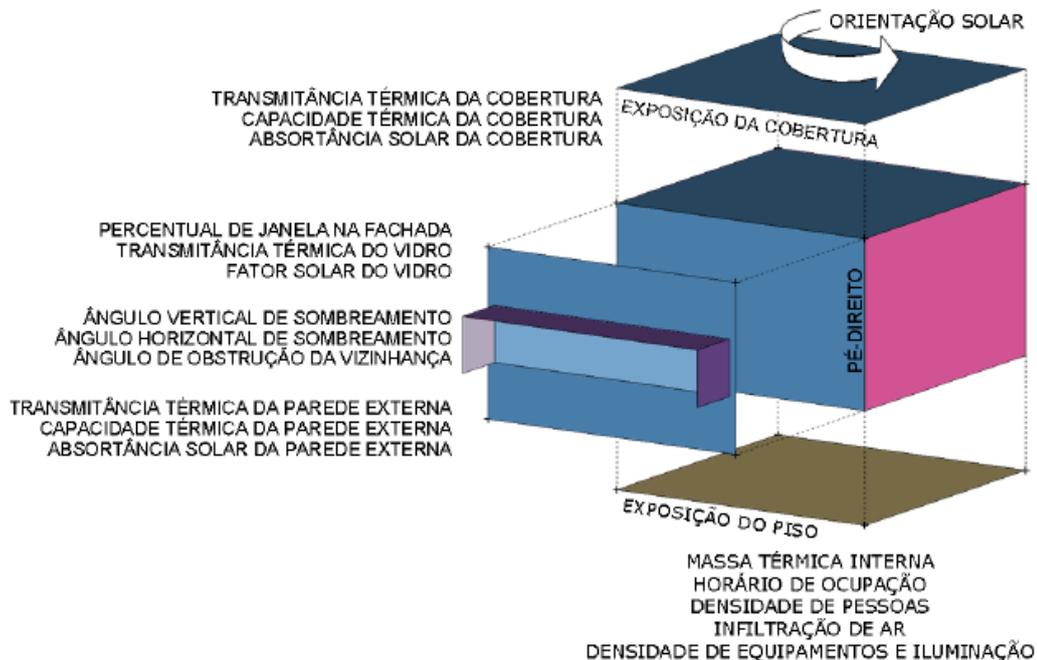


Figura 2: Representação do modelo de simulação

Fonte: Versage (2015)

Como a quantidade de casos a ser analisados e simulados era inviável, o número de casos foi reduzido utilizando o método de amostragem por Hipercubo Latino, uma vez que esta garante a homogeneidade da amostra. Os casos foram simulados com o auxílio de um *Cluster* computacional, com capacidade de simular 1,29 milhões de casos (1.293.250 casos) em um tempo reduzido.

Uma amostra desta base de dados foi utilizada para elaboração de metamodelos com as técnicas de regressão linear múltipla, regressão adaptativa multivariada por *splines*, processo gaussiano, máquina de vetores de suporte, *random forest* e redes neurais artificiais. Os metamodelos elaborados com estas técnicas estatísticas foram comparados quanto ao seu desempenho e aos recursos computacionais gastos para sua elaboração. O metamodelo de rede neural artificial, apresentou o melhor desempenho; com erros maiores que 10% para apenas 0,8% dos casos. Portanto, este foi o método escolhido para a elaboração do metamodelo, uma vez que apresentou o melhor desempenho comparado com outras técnicas estatísticas para a predição dos casos constituintes da base de dados assim como de outros nunca simulados.

## 2.3 CARGA TÉRMICA

Analisar a carga térmica de um edifício é fundamental para predizer seu desempenho térmico, assim como o conforto térmico. Define-se carga térmica como a quantidade de energia que deverá ser extraída (carga de resfriamento) ou fornecida (carga de aquecimento) ao ar do ambiente para mantê-lo em condições desejáveis de temperatura e umidade. O cálculo da carga térmica é usado geralmente para realizar o dimensionamento de sistemas de condicionamento de ar, como ventiladores, *chillers*, *boilers*, *fan-coils*, entre outros (HENSEN e LAMBERTS, 2011).

A carga térmica é calculada como a soma do calor sensível e do calor latente do ambiente. O calor sensível é o fenômeno no qual a temperatura do ar varia, porém, não há alteração na umidade absoluta. Enquanto que calor latente é a quantidade de calor necessária para ocorrer o fenômeno de evaporação ou condensação, sem alterar a temperatura do ar. Os fatores que influenciam a quantidade de carga térmica em determinado ambiente são: insolação, temperatura e umidade do ar externo, densidade de ocupação, atividade metabólica dos ocupantes, fechamentos opacos, fechamentos transparentes, iluminação artificial, equipamentos, infiltração e renovação do ar.

O edifício é geralmente dividido em “zonas” – parte da construção que pode ser considerada com temperatura do ar aproximadamente uniforme, isto porque possui características térmicas semelhantes, além do mesmo sistema de condicionamento de ar. Em cada zona térmica pode-se ter o controle do volume de calor que entra e que sai. Para tanto, isto requer a análise dos três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, tanto dentro do envelope do edifício como entre a interação do envelope do edifício com os arredores. O envelope da edificação separa o interior da edificação das condições climáticas externas, por exemplo, paredes, telhado, piso e janelas. Através do envelope ocorrem as trocas de calor e umidade e ar. É importante conhecer os mecanismos de transferência de calor para analisar o comportamento da edificação frente a diferentes materiais construtivos.

Sempre que existir uma diferença de temperatura entre diferentes meios, ocorre a transferência de energia térmica. O calor (ou fluxo de calor) é definido então como a taxa de energia térmica transferida por unidade de tempo devido a uma diferença de temperatura.

Quando esta transferência de calor se dá através de paredes e telhados, por exemplo, o mecanismo de transferência chama-se condução térmica. Na condução, a transferência de calor ocorre através de um meio sólido, o qual define a capacidade de conduzir calor de um meio

com temperaturas mais altas para as temperaturas mais baixas. A condução pode ser aproximada como sendo unidimensional, conforme representado na Figura 3. A quantidade de calor transferida por condução depende da área transversal através da qual o calor flui, da espessura por onde o calor se propaga, da diferença de temperatura e da condutividade do material.

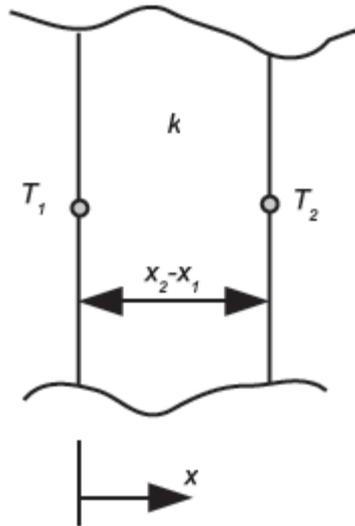


Figura 3: Transferência de calor por condução

Fonte: Hensen e Lamberts (2011)

A transferência de calor por convecção consiste no transporte de energia por meio de um fluido ou gás. Para o cálculo de carga é importante analisar a convecção entre o envelope e o ar interior e o ar exterior. A convecção ocorre como consequência de diferença de densidade do fluido. A magnitude depende de três fatores: área de contato entre fluido e superfície, diferença de temperatura entre fluido e superfície e coeficiente de troca por convecção (depende da viscosidade, velocidade e tipo de deslocamento do fluido).

A radiação térmica é a transferência de energia por ondas eletromagnéticas. Não precisa de meio para a propagação da radiação, ocorrendo no vácuo. A radiação de onda longa é emitida por fontes próximas da temperatura ambiente, tais como pessoas, equipamentos, paredes, entre outros. Enquanto que a radiação de onda curta corresponde ao comprimento de onda perto do espectro visível, como radiação solar. A quantidade radiação térmica absorvida, refletida, ou emitida por qualquer superfície depende das propriedades: absorvidade e refletividade.

A fim de determinar a condição térmica estabelecida na zona térmica, todos os mecanismos devem ser analisados ocorrendo simultaneamente, por meio do balanço térmico.

O objetivo é garantir a lei da conservação de energia. A lei estabelece que a quantidade de calor incidente na zona térmica soma-se à quantidade de calor gerada no interior da zona térmica, menos a quantidade de calor dissipado. A resultante é o aumento da quantidade de energia armazenada. A Figura 4 demonstra os fenômenos envolvidos no balanço térmico de superfícies opacas.

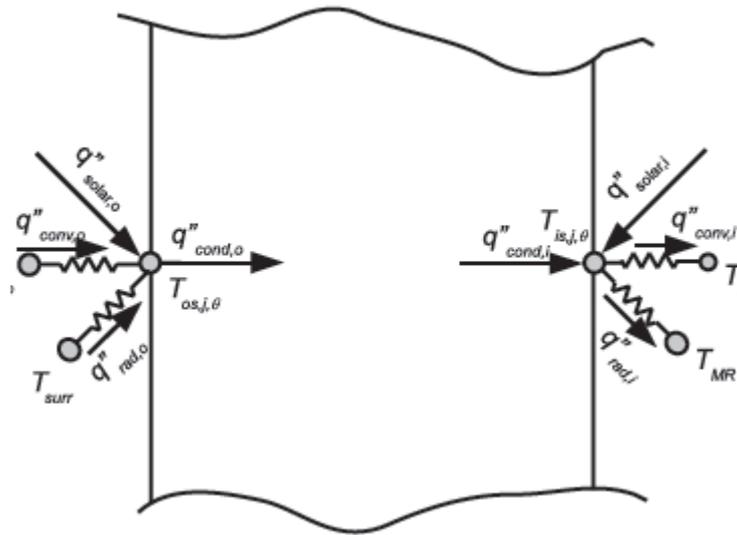


Figura 4: Balanço térmico em uma superfície opaca

Fonte: Hensen e Lamberts (2011)

## 2.4 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E NA CARGA TÉRMICA

As variáveis construtivas, assim como as rotinas de uso, têm forte influência no desempenho térmico das edificações. Como consequência da busca pelo conforto térmico, pode-se perceber a necessidade de maior demanda de energia elétrica, ou seja, maior consumo nas edificações. É importante identificar os parâmetros que respondem mais diretamente às variações construtivas e de uso da edificação, assim como saber a maneira como eles influenciam o desempenho energético de seu projeto. Desta forma, é mais fácil distinguir as decisões de projeto que podem favorecer ou atrapalhar o desempenho energético da edificação e, como consequência, é possível projetar edificações coerentes com seu uso mais eficiente energeticamente, assim como mantê-las. Projetos adequados podem garantir ao edifício uma economia de 30% no consumo de energia elétrica, em relação a outros que ofereçam níveis de conforto e utilização similares (GÓMEZ e LAMBERTS, 1995).

Bulla e Lamberts (1995) analisaram as influências de parâmetros, como fator de sombreamento dos vidros, percentual de abertura na fachada, absorvância e transmitância das paredes e telhado. Os parâmetros relacionados com as aberturas foram responsáveis por variações de 13% no consumo. O percentual de abertura das janelas e o coeficiente de sombreamento dos vidros (o chamado Fator Solar), demonstraram relação linear com o consumo de energia elétrica. A transmitância da parede demonstrou resultados não lineares, com o consumo mínimo atingido entre 2,0 e 3,0 W/m<sup>2</sup>.K. A variação no consumo com a alteração deste parâmetro foi de 0,5%. Para as paredes, apenas a absorvância causou variações significativas no consumo. A variação no consumo foi de 5% com a alteração da orientação. Em edifícios com apenas duas janelas em fachadas opostas, notou-se a redução da influência causada pelas aberturas e aumentou as variações causadas pela transmitância da parede e orientação. As características construtivas do telhado, a absorvância e a transmitância, também demonstraram relação linear com o consumo de energia elétrica. Observou-se que estas influências são mais significativas em edificações térreas. A densidade de iluminação mostrou ter grande influência por ser diretamente proporcional ao consumo de energia elétrica. Já o parâmetro relacionado a infiltração não apresentou relação linear.

O estudo realizado por Gómez e Lamberts (1995) foi conduzido através da simulação de edifícios comerciais, com características iguais quanto aos materiais, uso e área. Os parâmetros alterados em cada simulação foram o número de pavimentos, forma da planta, orientação e percentual de abertura da fachada (WWR). As alternativas com maior área de janela apresentaram maiores consumos de energia elétrica. Foi possível notar que o maior consumo corresponde ao edifício com 10 pavimentos, variando de 36% a 60% com a alteração do percentual de abertura de 30% a 60%.

Lam e Hui (1996) apresentaram um estudo no qual analisam as influências dos parâmetros nos resultados e discriminam o uso final do consumo de energia elétrica. Os parâmetros foram relacionados também com a carga elétrica e os perfis de demanda e cargas de refrigeração. Os seis parâmetros analisados quanto ao envelope foram: coeficiente de sombreamento, percentual de área de janela, carga de iluminação, carga de equipamentos, densidade de ocupação e a temperatura interna do ar. Observou-se uma tendência linear quanto à análise de sensibilidade do consumo com relação aos parâmetros considerados no estudo. As influências das variações foram proporcionais aos consumos isolados de cada parâmetro. Ao analisar o uso final do uso de energia elétrica, percebeu-se que cerca de 52% eram relativos à refrigeração do edifício, 31% relativos à iluminação, e 17% aos equipamentos. Para o aquecimento, o consumo de 0,3% foi considerado desprezível. Os autores perceberam uma

tendência linear quanto à análise de sensibilidade do consumo ao variar os parâmetros mencionados.

Lam *et al.* (1997) obtiveram equações com o intuito de mensurar o consumo de energia elétrica através do programa DOE-2. O estudo foi realizado em edifícios de escritório em Hong-Kong. Primeiramente, 387 simulações computacionais foram executadas, combinando 62 parâmetros de entradas. Destas, apenas 28 demonstraram apresentar relação direta com o consumo de energia elétrica. O consumo demonstrou ainda ser mais sensível à variação de doze destes parâmetros: seis relacionados ao envelope, quatro relacionados ao sistema de condicionamento de ar e dois aos equipamentos de condicionamento de ar. As variáveis significativas relacionadas ao envelope são: coeficiente de sombreamento dos vidros, percentual de abertura das janelas, temperatura interna do ar, carga interna de equipamentos, carga interna de iluminação, densidade de ocupação. O método de regressão múltipla foi utilizado para o desenvolvimento das equações, as quais correlacionam o consumo energético com a variação dos doze parâmetros.

Em busca de analisar as variáveis arquitetônicas e construtivas com maior influência na determinação do consumo de energia elétrica, Signor (1999) equacionou o consumo de eletricidade de edifícios de escritórios climatizados artificialmente, para 14 cidades brasileiras. Os resultados de cerca de 7000 simulações paramétricas foram obtidos por meio do programa VisualDOE, nos quais foram aplicados o método estatístico de regressões lineares múltiplas. A proposta inclui dez parâmetros considerados lineares. Os parâmetros mais significativos e que cobriram este trabalho para a análise foram: tamanho do edifício ( $\text{Área de Cobertura} / \text{Área Total}$  e  $\text{Área de Fachada} / \text{Área Total}$ ), os materiais que o compõem (transmitância e absorvância da cobertura e das paredes externas), a relação janela/fachada, brises e carga interna instalada. Cada parâmetro apresentou dois valores distintos com todas as combinações possíveis e assim, 1.024 simulações foram executadas. Como a transmitância térmica da parede demonstrou-se não-linear e pouco significativo, optou-se por descartá-la da análise, reduzindo para 512 o número de simulações por cidade. Por meio dos resultados das simulações é possível analisar os parâmetros mais influentes no consumo final do edifício. A relação entre as dimensões em planta do edifício, não demonstrou relação linear com o consumo. Porém, ao relacionar os fatores  $\text{Área de Zonas Externas} / \text{Área Total}$  ou  $\text{Área de Fachada} / \text{Área Total}$ , a tendência torna-se linear, ou seja, o consumo aumenta juntamente com o crescimento do fator. Com relação ao número de pavimentos, o fator analisado é  $\text{Área de Cobertura} / \text{Área Total}$ , onde nota-se a mesma relação. A área envidraçada apresenta relação linear com o consumo da edificação. O fator de sombreamento dos vidros comportou-se de forma semelhante. A transmitância do telhado

apresentou tendência linear, assim como as cores da cobertura. A transmitância da parede não apresentou linearidade do consumo frente a sua variação. Porém, as cores das fachadas apresentaram relação com o consumo. A variação nos valores de carga interna instalada, composta pela iluminação, equipamentos e ocupantes, também apresentou incrementos lineares no consumo de energia elétrica.

Ghisi *et al.* (2005) realizaram a análise das dimensões das aberturas capazes de proporcionar melhor desempenho na edificação por meio do aproveitamento da iluminação natural e garantindo a vista para o exterior. O objetivo foi analisar informações sobre iluminação natural em relação aos resultados obtidos por meio de simulações computacionais. O modelo simulado representa um edifício de 10 pavimentos, sem proteções solares nas janelas. A altura do pé-direito em todas as tipologias foi considerada de 2,80 m. O vidro simulado foi do tipo simples de 6 mm com transmitância térmica de 5,7 W/ (m<sup>2</sup>K). Neste modelo, foram alteradas as características da edificação quanto a geometrias, dimensões, áreas de janela e orientação. Observou-se que a área ideal de janela (área de janela na qual o consumo de energia é mínimo) não possui correlação direta com alguns parâmetros, apesar de estes influenciarem no consumo da edificação, tais como densidade de ocupação, densidade de potência de equipamentos, capacidade térmica, transmitância térmica, absorvância e transmitância de paredes e coberturas, transmitância à radiação visível dos vidros e taxa de infiltração. Em muitos casos, percebeu-se que as áreas ideais de janelas são menores do que as áreas mínimas recomendadas para garantir vista para o exterior. Porém, este fato não foi observado em salas estreitas e profundas. Para salas com menores dimensões, notou-se um aumento significativo no consumo de energia quando a área de janela adotada não correspondia à ideal. Percebeu-se que a orientação também influencia na área de janela. Através das simulações constatou-se que salas condicionadas artificialmente, que combinam o sistema de luz natural e artificial, quando apresentam pouca profundidade e menores dimensões, resultam em maiores consumos de energia, ao contrário do que é considerado pela literatura. Portanto, se observou correlação entre consumo de energia e o inverso da profundidade dos ambientes e foi mostrado que aproveitar a iluminação natural nem sempre significa reduzir o consumo de energia elétrica. A análise realizada verificou que existe incoerência entre a área de janela recomendada pela literatura, tanto para garantir vista para o exterior como para reduzir o consumo de energia através do aproveitamento da iluminação natural.

Santana (2006) avaliou a influência de parâmetros construtivos no consumo de energia elétrica através de simulações computacionais utilizando o programa *EnergyPlus*. Foi elaborado um modelo representativo dos edifícios de escritório em relação à caracterização

construtiva e de ocupação. Para mensurar a influência de cada parâmetro construtivo no consumo de energia elétrica, comparou-se os resultados provenientes do caso base com casos onde foram realizadas as alterações. Os parâmetros analisados foram: fator de projeção, entorno, coeficiente de sombreamento dos vidros, percentual de área de janela na fachada; orientação e transmitância térmica das paredes e da cobertura. Observou-se que o aumento de 10% no valor do percentual de abertura nas fachadas provoca um acréscimo de 2,9% no consumo de energia. Quanto à transmitância térmica, esperava-se que a relação fosse linear com o consumo de energia elétrica, porém o resultado foi diferente pois o comportamento da dissipação do calor foi outro pelo fato de as cargas térmicas internas serem elevadas. Portanto, com o aumento da transmitância térmica ocorreu maior perda de calor para o exterior, reduzindo a necessidade de condicionamento de ar. E com a redução da transmitância térmica, ocorreram menores perdas de calor pelas paredes. Portanto a carga interna permaneceu mais elevada, implicando no aumento de consumo de energia. Quanto à influência da transmitância térmica da cobertura em ambientes altos, as variações nos resultados ficam restritos à cobertura. Observou-se que diminuir  $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  o valor da transmitância térmica da cobertura, acarretou a redução de 0,5% no consumo de energia. Quanto à variação da carga térmica de resfriamento, observou-se que ocorreram variações significativas de carga e de consumo de energia, na análise da cobertura, uma vez que está mais vulnerável. Aumentar a transmitância térmica, resultou no acréscimo na carga térmica de resfriamento. Quanto à absorvância térmica da cobertura, notou-se que com o aumento de 10% na absorvância, o consumo de energia aumenta 1%. Ao tratar-se da parede, a mesma variação ocorre tendo como consequência o aumento de 1,9% no consumo de energia. Em ambos os casos, notou-se uma relação linear entre a absorvância e o consumo de energia. As maiores variações ocorreram quando o caso base foi comparado com casos de alta absorvância (cor preta), e as menores variações com a baixa absorvância (cor branca). Quando analisados diferentes tipos de brises, observou-se que a cada  $10^\circ$  de aumento no ângulo vertical de sombreamento nos brises horizontais, o consumo de energia variou 1,8%. Com a alteração nos valores do padrão de ocupação e o uso de equipamentos, se obteve variação máxima de 5,9% no consumo de energia. Ao se variar um sistema de condicionamento de ar mais eficiente para um menos eficiente, observou-se um aumento de 25,2% no consumo de energia.

Concluiu-se que o parâmetro construtivo mais significativo relacionado à envoltória das edificações foi o percentual de área de janela na fachada. Isto é explicado pelo fato de grande parte do calor proveniente da radiação solar incidir no edifício através dos vidros. Porém, o calor gerado pelas superfícies e objetos no interior da edificação tem dificuldade de sair através

do vidro, pelo fato de possuir a característica de ser opaco à radiação de ondas longas. O valor de absorvância das paredes e o sistema de ar-condicionado também apresentaram as maiores variações no consumo de energia. Os parâmetros que apresentaram pouca influência no consumo de energia foram o fator solar dos vidros, a transmitância térmica da cobertura e a orientação.

Melo (2007) analisou a influência de parâmetros em relação ao consumo anual de energia da edificação. Foram alteradas as condições de carga interna, absorvância solar externa, padrão de uso, área de janelas nas fachadas, entre outros. A análise realizada para uma edificação térrea de 50 m x 50 m, demonstrou que o aumento da transmitância térmica da cobertura teve como consequência o aumento do consumo de energia elétrica para todos os climas simulados. Porém, para a edificação com cinco pavimentos, observou-se que o aumento da transmitância térmica das paredes não significa necessariamente o aumento no consumo de energia elétrica. Nos casos simulados com alta densidade de carga interna ( $70\text{W}/\text{m}^2$ ), ou alto padrão de uso (12h), ou WWR de 20% e com baixa absorvância solar externa (20%) notou-se uma redução no consumo. Pelo fato de o valor da carga térmica gerada no interior da edificação ser elevado, o aumento da transmitância térmica tende a dissipar o calor para o exterior. Assim, o conforto térmico pode ser atingido com a redução do funcionamento do condicionamento de ar. Com o aumento da transmitância térmica da cobertura, notou-se grande incidência de calor através da cobertura e, conseqüentemente, no consumo de energia elétrica. Observou-se que a utilização de isolamento térmico nas paredes não é considerada uma boa estratégia para os climas analisados, pois o mesmo dificulta a dissipação de calor e aumenta o consumo. Concluiu-se que o aumento da transmitância térmica em combinação com outros parâmetros que resultem em um valor de carga térmica interna elevado, pode resultar em uma economia de energia na edificação.

O estudo de Motta (2007) focou na influência das aberturas da edificação, assim como as propriedades dos vidros. As simulações foram realizadas para o clima de Belo Horizonte e São Paulo, onde sete tipos de vidros foram analisados. Como resultado, concluiu-se que a espessura do vidro não apresentou grande influência no consumo energético: aumentou-se 50% a espessura e observou-se uma redução de apenas 4,5%. Porém, a alteração da cor do vidro para verde reduziu 27% o consumo. Neste estudo, foi possível observar grande influência no consumo energético quanto à orientação das aberturas. Quando estas encontraram-se voltadas para o sul, a redução no consumo foi superior a 50% para todas os climas analisados. Porém, ao analisá-las quando voltadas para o leste ou norte, observou-se redução no consumo diferente para as duas cidades. Portanto, as características do vidro devem ser levadas em conta quando

o intuito é reduzir o consumo energético. Além disso, é fundamental dar importância para o clima, incidência e orientação solar das aberturas.

Santana e Ghisi (2007) avaliaram a influência que o percentual de área de janela na fachada combinada com a absorvância de paredes externas reflete no consumo de energia elétrica. Verificou-se que uma parede com valor de percentual de área de janela pequeno está sujeito a variações de 21,6% no consumo de energia elétrica quando as cores da fachada são alteradas. Enquanto que o consumo de energia é menor ao se variar as absorvâncias da fachada em casos com maiores aberturas. Na outra análise, ao fixar o valor da absorvância externa em 10% verificou-se a variação no consumo de 41,6%, ao se aumentar o percentual de área de janela. Observou-se que o consumo de energia elétrica pode ser similar com diferentes valores de percentual de abertura da fachada associada com o valor da absorvância desta fachada. Portanto, a escolha destes dois parâmetros combinados pode contribuir para promover a eficiência energética de edifícios.

Melo e Lamberts (2008) realizaram uma análise paramétrica através de simulações. O caso base escolhido foi o caso 600 do método BESTEST, da ASHRAE *Standard* 140, simulados com climas opostos: Denver (Estados Unidos) e Florianópolis (Brasil). Os casos utilizaram diferentes valores de transmitância térmica e capacidade térmica das paredes e cobertura. No caso simulado em Denver, o valor da carga térmica chegou a dobrar quando se aumentou os valores de transmitância térmica dos elementos opacos. Porém, quando o mesmo foi feito para o caso de Florianópolis, o valor de carga térmica reduziu em até 33%. O estudo conclui que em regiões com o inverno rigoroso, a estratégia de paredes isoladas manteve a temperatura interna em condições de conforto térmico. Porém, quando utilizada em regiões mais quentes, o isolamento dificulta a dissipação do calor para o exterior, causando desconforto interno devido à temperatura interna elevada.

Carrières e Roriz (2008) avaliaram as consequências no consumo de energia elétrica e no conforto de edifícios de escritório da cidade de São Carlos (SP) por meio da alteração de parâmetros construtivos. Variou-se as características da orientação, sistema construtivo, percentagem de vidro na fachada, absorvância da fachada e da cobertura e renovações de ar. Portanto, um edifício de referência com cada parâmetro variável foi simulado com os demais parâmetros fixos a fim de mensurar a influência de cada um. Observou-se que a absorvância térmica da cobertura influenciou significativamente o consumo de energia, sendo este pavimento o que mais sofreu com a variação do parâmetro. Outros fatores que também influenciaram o consumo foram: porcentagem de janela na fachada, absorvância das paredes externas e o número de renovações de ar.

O estudo de Santos e Souza (2012) enfoca na influência das proteções solares no desempenho de edifícios. Foram avaliados pelo método prescritivo e pelo método de simulação edificações com e sem brises. Comparando-se os resultados e sabendo que o método prescritivo da envoltória do RTQ-C considera apenas o ângulo da proteção solar na avaliação, concluiu-se que a geometria e a orientação de tais dispositivos possuem significativa importância no consumo de energia da edificação.

Sorgato et al. (2014) analisaram a influência nos resultados de consumo da edificação ao modelar os vidros por meio do método simplificado do programa EnergyPlus. O método simplificado pode causar dúvidas quanto a sua confiabilidade, pelo fato de serem inseridos apenas três propriedades do vidro: transmitância térmica, fator solar e transmitância visível. Portanto, a análise dos resultados desenvolveu-se a partir da comparação dos resultados obtidos por meio do método simplificado e pelo método detalhado. Observou-se que, em todos os casos analisados neste estudo, os vidros modelados por meio do método simplificado obtiveram resultados com diferenças significativas em relação ao método detalhado de simulação. Notou-se resultados de consumo subestimados ao inserir dados de entrada de vidros de alto desempenho por meio do método simplificado quando comparado com os resultados do método detalhado.

Muitas pesquisas já foram realizadas com enfoque na parametrização de características construtivas. Conforme pode-se observar nas considerações deste capítulo, é importante identificar os parâmetros mais influentes no resultado de consumo de energia elétrica, pois por meio destes é possível melhorar o desempenho térmico de uma edificação, assim como reduzir o consumo de energia elétrica. Os principais parâmetros avaliados foram as características da envoltória como absorvância solar e transmitância térmica das paredes e cobertura, características das aberturas de fachada, propriedades dos vidros e orientação. Identificando os parâmetros mais influentes, é possível tomar decisões que contribuam mais com o desempenho térmico da edificação.

### 3 MÉTODO

#### 3.1 TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO

O modelo de referência adotado é um edifício comercial de escritório de médio porte, proveniente de uma pesquisa realizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2013).

A edificação possui um total de cinco pavimentos. A geometria proposta tem dimensões 50 x 30 x 13 m, portanto, a área total construída é de 8.300 m<sup>2</sup>, conforme exposto na Figura 5. As áreas das zonas térmicas pertencentes à edificação podem ser observadas na Tabela 3-1. Define-se zona térmica como uma porção da edificação onde considera-se a temperatura uniforme devido às características térmicas semelhantes e mesmo sistema de condicionamento de ar (HENSEN E LAMBERTS, 2011). As zonas térmicas possuem a mesma densidade de cargas térmicas internas (pessoas, equipamentos e iluminação).

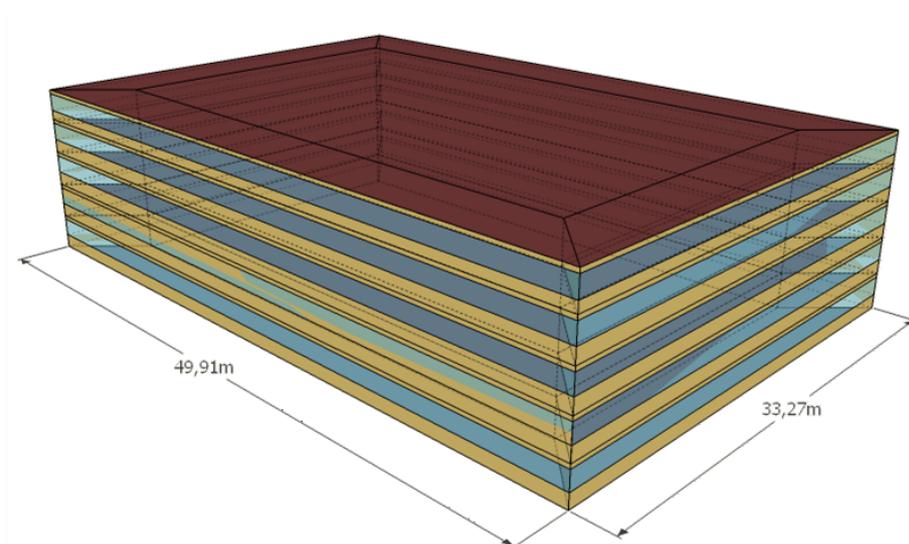


Figura 5 – Tipologia da edificação

Tabela 3-1 – Quadro de áreas de cada zona térmica

| Zona térmica | Áreas (m <sup>2</sup> ) |
|--------------|-------------------------|
| Zona 1       | 207,34                  |
| Zona 2       | 131,26                  |
| Zona 3       | 207,34                  |
| Zona 4       | 131,26                  |
| Zona 5       | 983,54                  |

Como considerado no metamodelo proposto por Versage (2015), a zona térmica interior da tipologia adotada é a área localizada a 4,5 metros das fachadas externas, e as zonas perimetrais são as áreas entre as fachadas externas e o limite de 4,5 metros adentro, separadas por orientação, conforme pode-se observar na Figura 6. Em cada zona térmica, apenas uma fachada é voltada para o exterior, as demais são paredes internas consideradas adiabáticas. Esta condição foi adotada para que a zona térmica possa representar qualquer pavimento da edificação, por meio da alteração das condições de contorno. As paredes internas, que delimitam as zonas térmicas, são construídas de gesso e são modeladas sem massa térmica, representando uma parede leve. O efeito de massa térmica interna é considerado em outro objeto do programa *EnergyPlus* (VERSAGE, 2015).

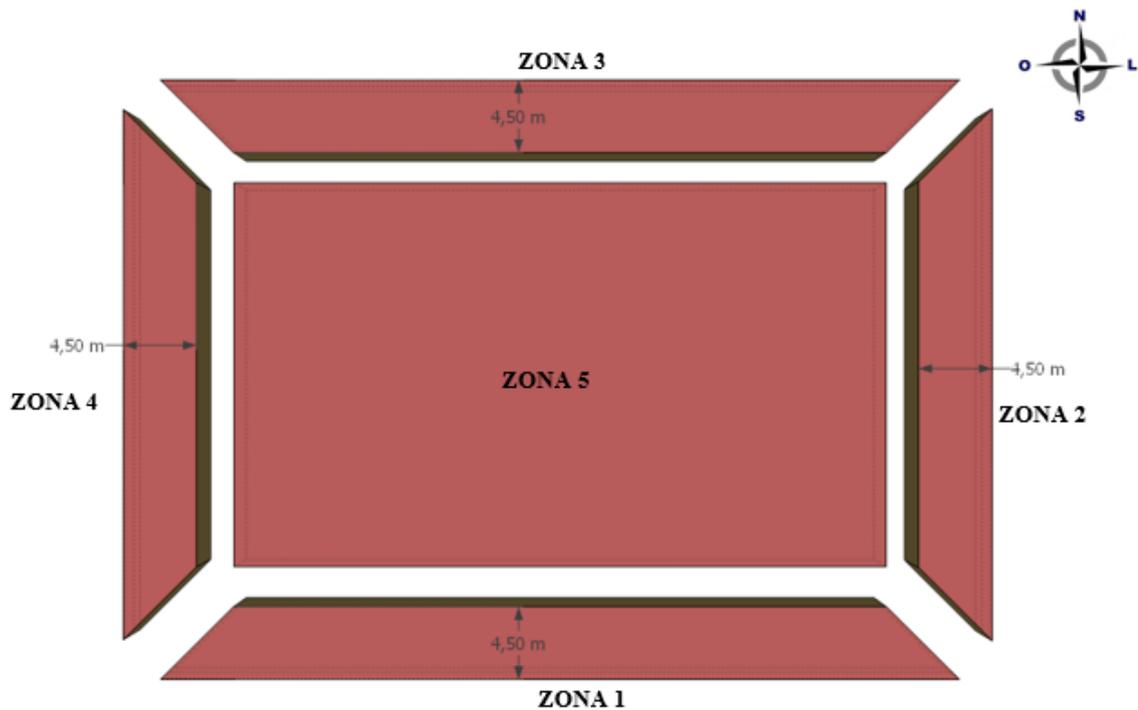


Figura 6- Representação das zonas térmicas

Considerou-se que a edificação está localizada na cidade de Florianópolis. O sistema de ar-condicionado inserido na edificação é do tipo *Ideal Load System*, sistema de condicionamento do tipo ideal o qual oferece a carga térmica necessária para manter o ambiente dentro das temperaturas desejadas.

As demais características da edificação foram extraídas do banco de dados elaborado no desenvolvimento do metamodelo (Tabela 2-1). Os parâmetros adotados nesta tipologia podem ser observados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Características da edificação modelo

| <b>Parâmetros</b>                                             | <b>Valor</b> |
|---------------------------------------------------------------|--------------|
| Azimute (graus)                                               | 180          |
| Densidade de potência de iluminação (W/m <sup>2</sup> )       | 12           |
| Densidade de potência de equipamentos (W/m <sup>2</sup> )     | 12           |
| Densidade de pessoas (pessoas/m <sup>2</sup> )                | 0,2          |
| Horário de ocupação (horas)                                   | 8            |
| Infiltração (ACH)                                             | 0,5          |
| Massa térmica interna (m <sup>2</sup> )                       | 0            |
| WWR (%)                                                       | 0,5          |
| Transmitância térmica do vidro (W/m <sup>2</sup> .K)          | 5,7          |
| Fator solar do vidro (-)                                      | 0,87         |
| Ângulo horizontal de sombreamento (°)                         | 0            |
| Ângulo vertical de sombreamento (°)                           | 0            |
| Ângulo de obstrução da vizinhança (°)                         | 0            |
| Absortância solar da cobertura (-)                            | 0,2          |
| Transmitância térmica da cobertura (W/m <sup>2</sup> .K)      | 3,31         |
| Capacitância térmica da cobertura (kJ/m <sup>2</sup> .K)      | 220          |
| Absortância solar da parede externa                           | 0,7          |
| Transmitância térmica da parede externa (W/m <sup>2</sup> .K) | 2,44         |
| Capacitância térmica da parede externa (kJ/m <sup>2</sup> .K) | 220          |
| Altura do pé-direito (m)                                      | 2,6          |

Observa-se que as orientações das maiores fachadas são voltadas para o norte e sul. Cada pavimento possui pé-direito de 2,6 metros.

Os horários de funcionamento devem ser considerados nos cálculos de carga térmica do ambiente analisado, uma vez que a ocupação, iluminação, equipamentos, abertura das janelas dependem da rotina dos ocupantes. Foi considerado o padrão de uso das 9h às 17h, em dias de semana, com 100% de ocupação, de carga de iluminação e de equipamentos. Nos finais de semana e feriados não foi considerado ocupação. A quantidade de pessoas por área e suas atividades é de fundamental importância, uma vez que as pessoas que ocupam o prédio geram calor. Conforme a atividade realizada no ambiente, o calor proveniente do metabolismo das pessoas será diferente. A densidade de ocupação considerado para a edificação será de 0,2 pessoas/m<sup>2</sup>, valor pertencente ao banco de dados do metamodelo. A densidade de potência para o sistema de iluminação e também de equipamentos adotada é 12 W/m<sup>2</sup>.

A especificação de valores de taxa de infiltração foi realizada por meio de “trocas de ar por hora”, onde é considerada a renovação do volume de ar da zona térmica pela infiltração de ar do ambiente externo. O valor de infiltração considerado pertencente à base de dados foi de 0,5 ACH (*air change per hour*).

A parede externa será composta de 10 cm de concreto e 5 mm de isolante térmico, com valor de transmitância térmica de 2,44 W/m<sup>2</sup>.K. Enquanto que a cobertura possui uma laje de 10 cm de concreto, com valor de transmitância térmica de 3,31 W/m<sup>2</sup>.K. Ambas as construções possuem capacidade térmica de 220 kJ/m<sup>2</sup>.K. A camada de isolamento é modelada voltada para o interior da zona térmica para reproduzir o efeito de atraso térmico da massa do concreto (VERSAGE, 2015).

O percentual de abertura da janela é dado pela relação entre a área de janela e a área da fachada correspondente. O percentual de abertura da fachada (WWR) adotado para a edificação é de 50%. Estas aberturas são constituídas de vidro simples 3 mm. A transmitância térmica média do vidro simples 3 mm é de 5,7 W/m<sup>2</sup>.K.

O objeto que tem como função controlar o efeito de massa térmica interna é considerado variando a área de uma parede interna de 10 cm de concreto (220 kJ/m<sup>2</sup>.K). A área da parede corresponde ao produto do pé-direito pelo comprimento linear da parede, considerando que a mesma é construída de concreto. Para outros tipos de parede, é necessário calcular as novas dimensões em relação à parede de concreto, ou seja, multiplica-se o comprimento linear da parede pela capacidade térmica do material construtivo desejado, e divide-se pela capacidade térmica do concreto (220 kJ/m<sup>2</sup>.K). Desta forma, o valor adotado para a massa térmica interna pode representar deste uma massa desprezível de construções leves, até um sistema construtivo pesado usado nas paredes e coberturas, construído com qualquer material. No modelo de referência, considera-se que não há massa térmica interna. Isto porque, as únicas paredes internas do edifício são as que delimitam as cinco zonas térmicas internas em cada pavimento, não havendo divisórias no interior de nenhuma zona térmica.

### 3.2 ANÁLISE DAS CONSIDERAÇÕES ADOTADAS POR VERSAGE (2015)

O método aqui proposto se aplica ao estudo da carga térmica de edificações comerciais condicionadas artificialmente. Primeiramente, percebeu-se a necessidade em verificar se as condições consideradas no desenvolvimento do metamodelo apresentam precisão, isto porque

houve simplificações nos dados de entrada. Portanto, a primeira parte do método tem como objetivo avaliar a precisão dos resultados de carga térmica de resfriamento obtidos por simulação computacional diante de diferentes condições de entrada de dados, onde o edifício de referência será a base de entrada para realizar as alterações e, posteriormente, executar as simulações. O programa escolhido para efetuar as simulações foi o *EnergyPlus* versão 8.0 (DOE, 2013), tanto por ser um dos programas mais utilizados atualmente em pesquisas em diversos países, quanto pela confiabilidade de seu algoritmo. O arquivo climático adotado é do tipo TRY para a cidade de Florianópolis/SC de 1963.

As principais condições de entrada que despertaram dúvida por serem adotadas no desenvolvimento do metamodelo, e que serão analisadas neste trabalho é o fato de: as zonas térmicas serem simuladas individualmente, além de as paredes internas serem consideradas adiabáticas.

### **3.2.1 Influência ao simular zonas térmicas individualmente**

O metamodelo proposto por Versage (2015) avalia edifícios por meio do desempenho individual de suas zonas térmicas. Desta forma, todos os parâmetros variáveis que se deseja adotar são manipulados em uma zona térmica utilizada como caso base para executar as simulações, e combinados no arquivo de entrada do *EnergyPlus*. Neste caso, o desempenho da edificação completa será definido pela ponderação das avaliações de cada uma das zonas térmicas. Por meio da simulação, quando deseja-se predizer a carga térmica de uma edificação, todas as zonas pertencentes a ela são simuladas de uma vez. Por isso, primeiramente, é importante verificar se a consideração adotada para o desenvolvimento do metamodelo em simular cada zona individualmente e posteriormente aplicar a ponderação das áreas condiz com a realidade da edificação.

Por meio das simulações computacionais, será possível verificar a influência nos resultados de carga térmica de resfriamento quando uma única zona pertencente à edificação for simulada individualmente, em relação a simulação da edificação completa.

O fato de as paredes internas serem consideradas adiabáticas permitem que as zonas térmicas representem qualquer ambiente da edificação. Para tanto, as condições de contorno das zonas térmicas são respeitadas. Ao se referir ao pavimento térreo, o piso é considerado em contato com o solo, e o teto adiabático; os pavimentos tipo apresentam ambas as superfícies com condições adiabáticas, e a cobertura apresenta o piso adiabático e o teto exposto às

condições do sol e vento. As condições do piso e do teto que variam para representar cada pavimento, podem ser melhor visualizadas na Figura 7.

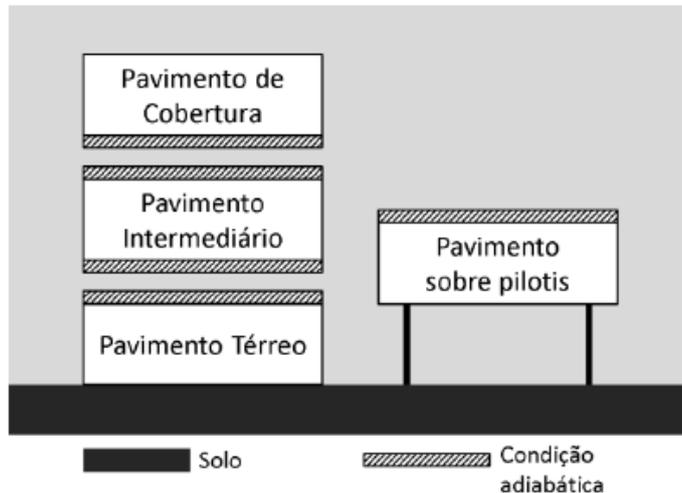


Figura 7- Condições de contorno dos pavimentos

FONTE: VERSAGE (2015)

Serão analisadas uma edificação com um pavimento e uma edificação com cinco pavimentos. Primeiramente, a simulação computacional da edificação será executada como o usual, ou seja, com a presença de todas as zonas térmicas que a constituem.

Em seguida, a edificação descrita anteriormente será desmembrada em zonas térmicas. Cada zona será simulada individualmente por meio do *EnergyPlus*. Neste caso serão executadas no total 15 simulações: 5 para cada pavimento. As zonas térmicas diferenciam-se pelas características da orientação e pelas condições de contorno. A Figura 8 representa as duas maneiras analisadas quanto a modelagem da edificação.

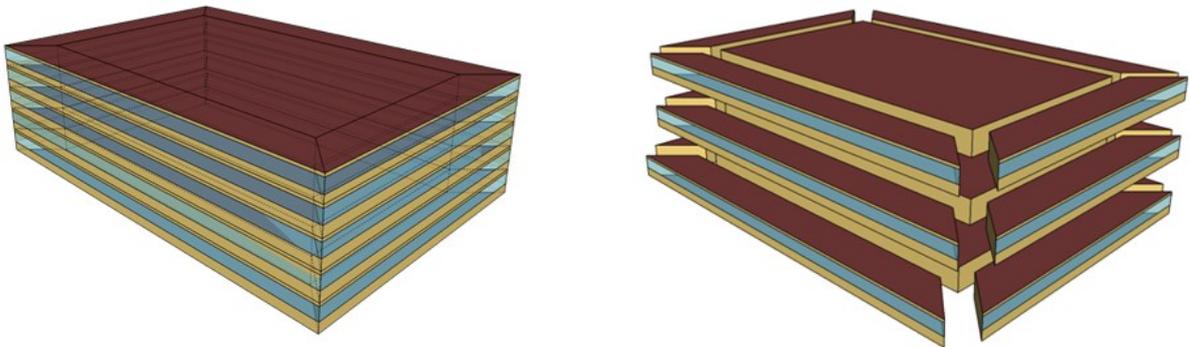


Figura 8- Simulação da edificação completa versus simulação das zonas térmicas

Para representar uma edificação térrea, o mesmo procedimento descrito anteriormente será repetido. Primeiramente, a edificação será simulada com todas as 5 zonas térmicas pertencentes, respeitando as condições de contorno. Em seguida, serão simuladas 5 zonas térmicas individualmente representando um pavimento. As condições de contorno de uma edificação de apenas um pavimento são: piso em contato com o solo e cobertura exposta às condições atmosféricas.

O resultado analisado será a carga térmica de resfriamento correspondente a cada zona térmica em kWh/m<sup>2</sup>. Será realizada a comparação dos resultados de carga térmica de resfriamento para cada zona térmica, onde os resultados serão apresentados por meio de tabelas, com as devidas comparações. Por fim, para mensurar a carga térmica da edificação, será realizada a ponderação dos resultados pelas respectivas áreas. Como em ambas as maneiras simuladas as paredes foram consideradas adiabáticas, nenhum dos dois modelos descritos sofrem influência de outras zonas térmicas.

Com esta comparação, é possível analisar a precisão de mensurar o desempenho térmico da edificação, assim como de prever o desempenho de qualquer zona térmica da edificação.

### **3.2.2 Influência das paredes internas adiabáticas**

Também será realizada uma análise com o objetivo de verificar a influência de considerar as paredes internas como adiabáticas, conforme determinado no desenvolvimento do metamodelo. Afinal, sabe-se que a realidade não condiz com tal suposição, pois sempre ocorre troca de calor entre as zonas térmicas através das superfícies.

Desta forma, o edifício de referência será simulado por meio do programa *EnergyPlus*, primeiramente obedecendo as condições impostas pelo metamodelo, ou seja, com as paredes internas adiabáticas e constituídas de gesso. Posteriormente, as mesmas paredes serão modeladas em contato com as paredes das zonas térmicas adjacentes, representando o caso de paredes não adiabáticas, conforme observa-se na realidade. Serão analisados um edifício térreo e um edifício de cinco pavimentos, onde a modelagem é realizada por meio do objeto *multiplier*, sendo assim, os pisos e tetos dos pavimentos intermediários são considerados adiabáticos porque estes repetem-se três vezes.

Com o intuito de obter o resultado da edificação, serão ponderados os resultados de carga térmica das zonas térmicas constituintes pelas suas respectivas áreas. Os resultados

obtidos por meio da simulação computacional para ambos os casos de modelagem das paredes internas serão comparados.

### 3.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO POR VERSAGE (2015)

O método desenvolvido por Versage (2015) será aplicado para o modelo de referência. Como resultados, serão fornecidos os valores de carga térmica de resfriamento anual integrada obtido para cada zona térmica (kWh/m<sup>2</sup>.ano). Posteriormente, as mesmas características serão inseridas na simulação computacional, por meio do programa *EnergyPlus*. A comparação dos resultados obtidos por meio da aplicação do metamodelo e da simulação computacional será realizada para cada zona térmica pertencente à edificação. Será realizada uma ponderação dos valores da carga térmica de resfriamento de todas as zonas térmicas em função da área correspondente, afim de representar o edifício. Serão comparados os resultados da edificação e analisada a diferença nos resultados encontrados.

Na aplicação do método, são solicitados os dados de entrada de cada zona térmica constituinte da edificação, sendo que cada uma apresenta apenas uma fachada voltada para o exterior. Foram inseridos, portanto, as características de 15 zonas térmicas, 5 de cada pavimento. As características dos três pavimentos tipos são iguais.

Observa-se que o pavimento térreo, tipo e cobertura diferenciam-se pelas condições de contorno, quanto à exposição da cobertura e do piso. Desta forma, quando se diz respeito ao pavimento térreo, o piso é considerado em contato com o solo e o teto adiabático; o pavimento tipo, tanto o piso como o teto são adiabáticos; e na cobertura o piso é adiabático e o teto exposto ao sol e vento.

Além disso, também deve ser acrescentada a orientação de cada zona térmica, sendo 180° para a zona sul, 90° para a zona leste, 0° para a zona norte e, por fim, 270° representando a zona oeste.

As paredes internas de todos os pavimentos, o piso e a cobertura dos pavimentos intermediários são consideradas adiabáticos. Cada zona encontra-se isolada de qualquer troca de calor com o meio externo e entre as zonas. Sendo assim, a carga gerada pela ocupação, a densidade de equipamentos e de iluminação de cada zona ficam restritas à mesma.

Os dados de entrada utilizados são valores pertencentes à base de dados do desenvolvimento do metamodelo (VERSAGE, 2015). Itens preenchidos com o valor zero, dizem respeito a dados de entrada que não se aplicam ao pavimento em questão.

Quando se diz respeito às zonas perimetrais, são inseridos valores de entrada como exposto na Tabela 3-3, onde observa-se os dados de entrada para cada pavimento.

Tabela 3-3– Dados de entrada do pavimento térreo, tipo e cobertura de zonas perimetrais

| <b>Parâmetros</b>                                             | <b>Térreo</b> | <b>Tipo</b> | <b>Cobertura</b> |
|---------------------------------------------------------------|---------------|-------------|------------------|
| Densidade de potência de iluminação (W/m <sup>2</sup> )       | 12            | 12          | 12               |
| Densidade de potência de equipamentos (W/m <sup>2</sup> )     | 12            | 12          | 12               |
| Densidade de pessoas (pessoas/m <sup>2</sup> )                | 0,2           | 0,2         | 0,2              |
| Horário de ocupação (horas)                                   | 8             | 8           | 8                |
| Infiltração (ACH)                                             | 0,5           | 0,5         | 0,5              |
| Massa térmica interna (m <sup>2</sup> )                       | 0             | 0           | 0                |
| WWR (%)                                                       | 0,5           | 0,5         | 0,5              |
| Transmitância térmica do vidro (W/m <sup>2</sup> .K)          | 5,7           | 5,7         | 5,7              |
| Fator solar do vidro                                          | 0,87          | 0,87        | 0,87             |
| Ângulo horizontal de sombreamento                             | 0             | 0           | 0                |
| Ângulo vertical de sombreamento                               | 0             | 0           | 0                |
| Ângulo de obstrução da vizinhança                             | 0             | 0           | 0                |
| Absortância solar da cobertura                                | 0             | 0           | 0,2              |
| Transmitância térmica da cobertura (W/m <sup>2</sup> .K)      | 3,31          | 3,31        | 3,31             |
| Capacidade térmica da cobertura (kJ/m <sup>2</sup> .K)        | 220           | 220         | 220              |
| Absortância solar da parede externa                           | 0,7           | 0,7         | 0,7              |
| Transmitância térmica da parede externa (W/m <sup>2</sup> .K) | 2,44          | 2,44        | 2,44             |
| Capacidade térmica da parede externa (kJ/m <sup>2</sup> .K)   | 220           | 220         | 220              |
| Tipo de piso                                                  | 0             | 0           | 0                |
| Pé-direito (m)                                                | 2,6           | 2,6         | 2,6              |
| Zona interna                                                  | 0             | 0           | 0                |
| Exposição da cobertura                                        | adiabática    | adiabática  | externa          |
| Exposição do piso                                             | solo          | adiabática  | adiabática       |

No que diz respeito a zona central, a qual diferencia-se das zonas perimetrais por não possuir fachada voltada para o exterior, as características da parede externa não devem ser inseridas; assim como características a respeito do vidro, onde não há a presença de área envidraçada.

O metamodelo possui a opção de inserir o objeto massa interna, que representa as possíveis divisórias existentes em cada zona térmica. É conveniente inserir este objeto em casos onde ambientes diferentes pertencem à mesma zona térmica, uma vez que as cargas internas, representadas pela densidade de pessoas, iluminação e equipamentos, são as mesmas. Desta forma, as divisórias existentes não representam necessariamente a separação de zonas. São consideradas divisórias com 10 cm de concreto (220 kJ/m<sup>2</sup>K), na qual a área varia em função

do sistema construtivo: massa desprezível de construções leves, até a um sistema construtivo pesado usado nas paredes e coberturas. Inicialmente, o modelo é considerado sem divisões internas nas zonas térmicas, com a massa interna no valor zero.

Para a modelagem do piso existem duas construções possíveis: 10 cm de concreto, com ou sem isolante térmico. Como o piso modelado não é composto de isolante térmico, o parâmetro “tipo de piso” é preenchido com o valor zero. Caso contrário, havendo isolante térmico além do concreto, deve ser preenchido com o valor “1”.

### 3.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS

A tipologia descrita anteriormente será considerada como modelo de referência, pois servirá como base para as variações dos parâmetros de entrada.

Optou-se em alterar alguns parâmetros dos dados de entrada da base de dados, visando verificar a hipótese de que o metamodelo pode representar com precisão o desempenho energético de edificações comerciais condicionadas artificialmente, considerando diferentes complexidades de parâmetros físicos, geométricos e de carga térmica interna.

Portanto, o objetivo desta análise é verificar a precisão da aplicação do metamodelo para casos com valores de parâmetros não vistos. Assim, é possível identificar erros ou limitações do método, consequentes da simplificação do metamodelo. Serão escolhidos valores intermediários aos pertencentes ao banco de dados, assim como valores que extrapolam.

A influência da variação dos parâmetros pode ser observada por meio da comparação dos resultados de carga térmica obtido para modelo de referência com a alternativa em análise. Esta comparação será realizada tanto para os resultados do metamodelo como para os obtidos por meio da simulação computacional. Assim, é possível observar a precisão do metamodelo frente ao uso de simulação computacional, com diferentes casos de aspectos construtivos, geométricos, ocupação, iluminação e equipamentos.

Cada alternativa será analisada individualmente, para realizar a comparação entre a simulação e o metamodelo. Serão comparados os resultados de cada zona térmica, a fim de verificar a orientação e pavimento em que se encontram as zonas térmicas que apresentam os piores resultados em comparação com o caso simulado. O valor total de carga térmica de resfriamento do edifício, obtido por meio da ponderação dos resultados de todas as zonas térmicas, também será comparado entre o metamodelo e a simulação.

### 3.4.1 Variação da construção da parede externa

O desempenho térmico de paredes externas está relacionado com as propriedades que determinam seu comportamento diante da diferença de temperatura entre os ambientes. Este fato é essencial para que a transmissão de calor ocorra. As principais características correlacionadas com o desempenho das superfícies são: a transmitância térmica ( $U_{par}$ ), capacidade térmica ( $CT_{par}$ ) e absorvância solar ( $\alpha_{Par}$ ). Estes fatores são considerados dados de entrada para a aplicação do metamodelo. No programa *EnergyPlus*, os dados de entrada das construções são as propriedades dos materiais constituintes, tais como a espessura, densidade de massa aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ), calor específico ( $c$ ) e absorvância solar ( $\alpha$ ). Estes dados encontram-se na NBR 15220 – Parte 2 (ABNT, 2005), assim como os procedimentos para o cálculo das propriedades térmicas.

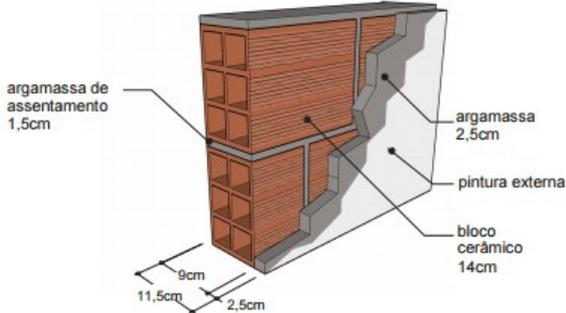
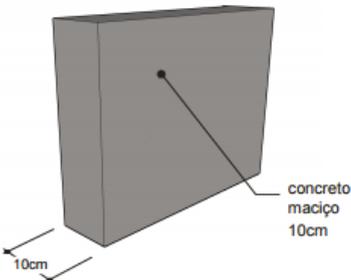
A composição da parede do modelo de referência é constituída de uma camada de concreto de 10 cm e outra de 0,5 cm de isolante térmico. Esta construção de parede foi simulada no desenvolvimento do metamodelo, portanto os valores das propriedades térmicas adotadas pertencem ao banco de dados do desenvolvimento do metamodelo.

Serão analisados os resultados de carga térmica de resfriamento com a modificação da construção da parede externa da edificação, tanto por meio do metamodelo como pela simulação computacional. O objetivo é verificar se, com outras construções de paredes, diferente de concreto e isolante térmico, o resultado de carga térmica de resfriamento será coerente com o obtido por meio do programa *EnergyPlus*. Valores de transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar que não se encontram no banco de dados da pesquisa de Versage (2015) serão utilizados.

Serão analisadas três alternativas, conforme pode-se observar na Tabela 3-4. A alternativa 1 será representada por uma parede externa composta de tijolo e reboco. Os tijolos são de 6 furos circulares (9 cm x 14 cm x 24 cm), assentados na menor dimensão. A camada de emboço externa é composta por argamassa de 2,5 cm de espessura, finalizada com uma camada de pintura de cor escura (absorvância alta, no valor de 0,7). A espessura total da parede leve é 11,5 cm. A parede da alternativa 2 é semelhante, porém a pintura é de cor clara (absorvância baixa, no valor de 0,2). A alternativa 3 é construída apenas de 10 cm concreto maciço revestida com pintura de cor escura, com absorvância solar ( $\alpha_{Par}$ ) de 0,7.

Tabela 3-4- Variações realizadas nas paredes externas

FONTE: Morishita *et al.*, 2011

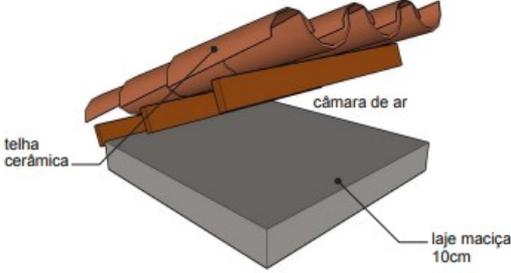
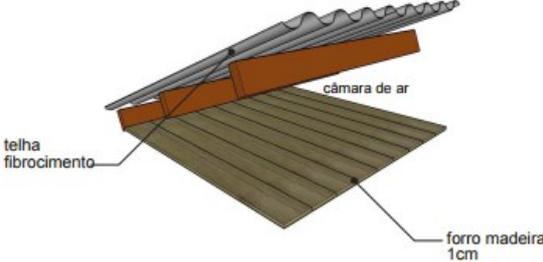
| Parede                                                                             | Parâmetros                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p><b>Alternativa 1 e 2</b></p> <p><math>U_{par} = 2,51 \text{ W/m}^2.\text{K}</math></p> <p><math>CT_{par} = 98 \text{ kJ/m}^2.\text{K}</math></p> |
|  | <p><b>Alternativa 3</b></p> <p><math>U_{par} = 4,84 \text{ W/m}^2.\text{K}</math></p> <p><math>CT_{par} = 240 \text{ kJ/m}^2.\text{K}</math></p>    |

### 3.4.2 Variação da construção da cobertura

Nas alternativas 4 e 5 será modificada a construção da cobertura. Na alternativa 4 a cobertura será construída com 10 cm de laje maciça, câmara de ar e telha de barro, com absorvância solar ( $\alpha_{Cob}$ ) de 0,7. Na alternativa 5 a cobertura será construída com forro de madeira de 1,0 cm, câmara de ar e telha de fibrocimento com absorvância solar de 0,2. As propriedades térmicas podem ser visualizadas na Tabela 3-5. O objetivo das alternativas é verificar a influência de alterar os materiais da construção da cobertura, uma vez que no modelo de referência esta é constituída de 10 cm concreto e 0,5 cm de isolante térmico.

Tabela 3-5- Variações realizadas na cobertura

FONTE: Morishita *et al.*, 2011

| Cobertura                                                                                                                                                                       | Parâmetros                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Diagrama de uma cobertura com telha cerâmica, câmara de ar e laje maciça de 10cm.</p>      | <p><b>Alternativa 4</b></p> <p><math>U_{cob} = 2,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}</math></p> <p><math>CT_{cob} = 238 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}</math></p> |
|  <p>Diagrama de uma cobertura com telha fibrocimento, câmara de ar e forro madeira de 1cm.</p> | <p><b>Alternativa 5</b></p> <p><math>U_{cob} = 2,11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}</math></p> <p><math>CT_{cob} = 21 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}</math></p>  |

### 3.4.3 Variação dos percentuais de abertura

O percentual de abertura da janela (WWR) é dado pela relação entre a área de janela e a área da fachada correspondente. É importante analisar este parâmetro porque é através do vidro que ocorrem muitas trocas de calor entre o interior e o meio externo da edificação.

Ao dimensionar as janelas é importante analisar se a contribuição em termos de iluminação e vista para o exterior não prejudicam o consumo da edificação, uma vez que quanto mais amplas as janelas, maiores as trocas de calor entre o meio interno e externo (GHISI *et al.*, 2005).

A fim de verificar a influência das dimensões das janelas quanto à incidência de carga térmica na edificação, a percentagem de área de janela na fachada (WWR) será variada. Na alternativa 6, as aberturas serão reduzidas em relação à edificação de referência, assumindo o valor de 25%. Na alternativa 7, as aberturas serão ampliadas, com o valor de 75%. O valor de WWR é considerado igual para todas as fachadas.

A orientação da fachada com aberturas também é importante, uma vez que a incidência da radiação solar difere para cada fachada do edifício. Com o intuito de quantificar tal influência, as localizações das aberturas serão variadas. Na alternativa 8, as aberturas serão

localizadas somente nas maiores fachadas: norte e sul. Enquanto que na alternativa 9, as aberturas serão localizadas somente nas fachadas leste e oeste.

#### 3.4.4 A modelagem do vidro

No metamodelo, a condição de entrada adotada para a modelagem do vidro é realizada utilizando o método simplificado de simulação, por meio do objeto *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem* (VERSAGE, 2015) do programa *EnergyPlus*. Desta forma, são inseridas somente as características do vidro quanto ao fator solar (FS), transmitância térmica ( $U_{\text{vidro}}$ ) e transmissão visível. Existe outra maneira de modelar as janelas no programa *EnergyPlus*, onde mais dados de entrada devem ser especificados. Esta simulação detalhada é executada por meio do objeto *WindowMaterial:Glazing*. Neste objeto são inseridas características adicionais do vidro, tais como: transmissão direta da radiação, reflexão nas faces interna e externa, emissividade e condutividade. Nas Figuras 9 e 10 pode-se observar a inserção dos dados de entrada no programa *EnergyPlus*, por meio do objeto simplificado e pelo objeto detalhado, respectivamente.

Nesta alternativa, o vidro no programa *EnergyPlus* será modelado por meio do objeto detalhado, afim de verificar o quão preciso é utilizar o método simplificado, como é modelado no metamodelo. Serão simuladas duas alternativas. A alternativa 10 representa um vidro simples, assim como adotado no modelo de referência. Portanto, o de SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient*) continua com o valor de 0,87 e a transmitância térmica  $5,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Nesta opção, somente o método de modelagem é alterado a fim de comparar o resultado obtido por meio do *EnergyPlus* (método detalhado) com a aplicação do metamodelo (método simplificado). Na alternativa 11, o vidro simulado é do tipo duplo, com SHGC no valor de 0,2 e transmitância térmica de  $1,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

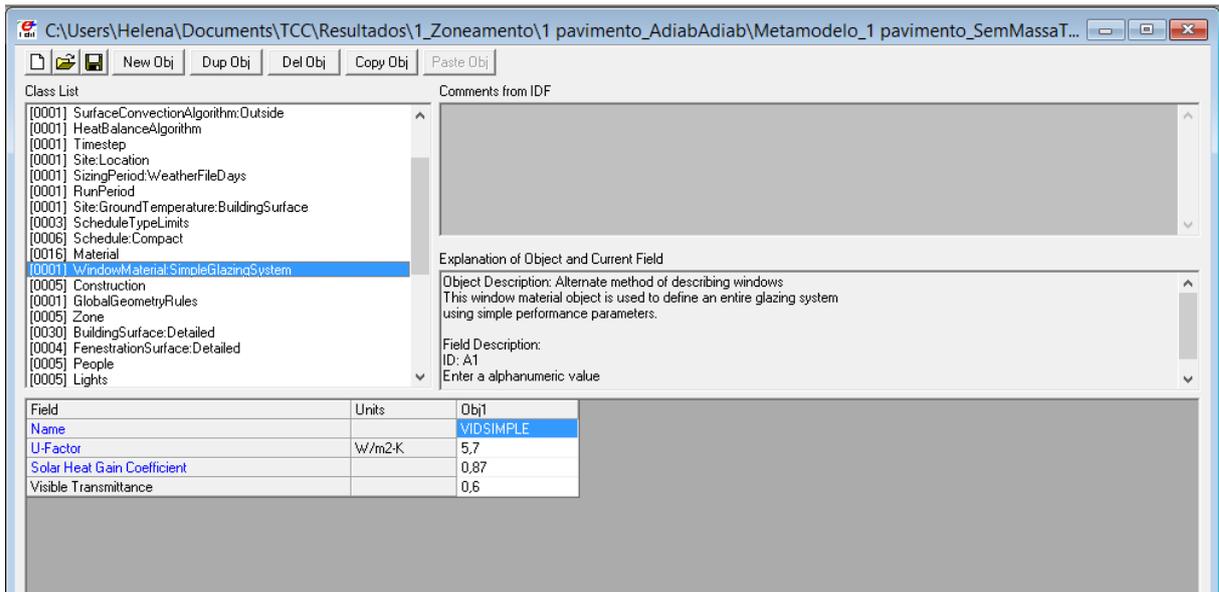


Figura 9: Método simplificado para modelagem de vidros

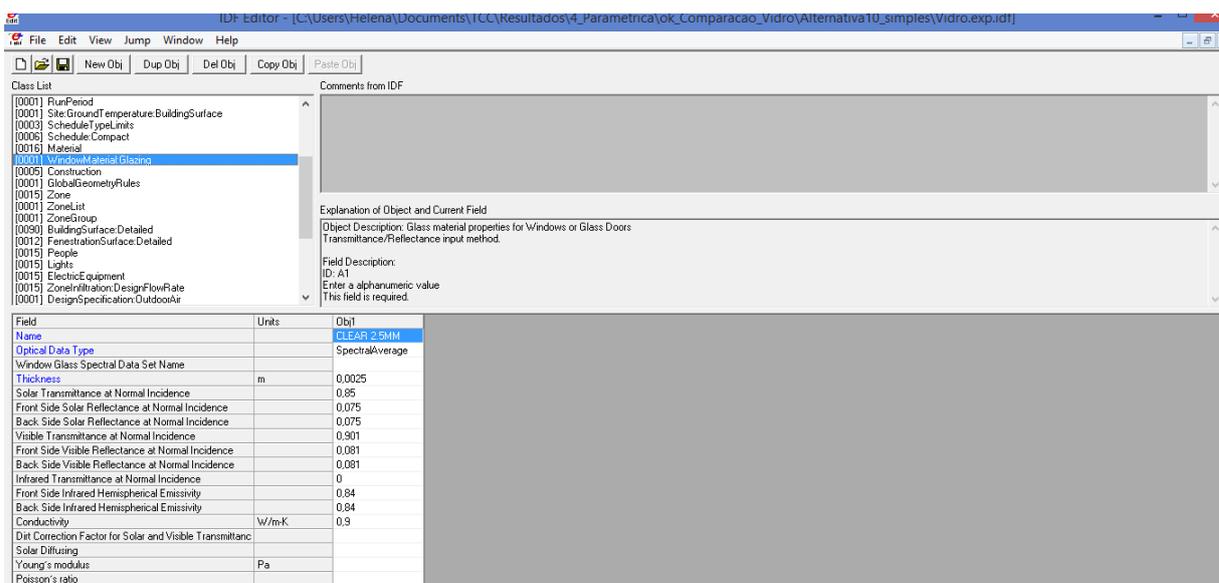


Figura 10: Método detalhado para modelagem de vidros

### 3.4.5 Variação da carga térmica interna

A densidade de carga interna é constituída pela carga interna de iluminação, equipamentos e ocupação.

A quantidade de pessoas no ambiente assim como a atividade desenvolvida é de fundamental importância na avaliação do desempenho térmico da edificação. Os equipamentos e iluminação também liberam energia no ambiente. As alternativas modificadas podem ser observadas destacadas em negrito na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Cargas térmicas internas em cada zona térmica

| <b>Parâmetro</b>                                          | <b>Zona térmica</b> | <b>Alt12</b> | <b>Alt13</b> | <b>Alt14</b> | <b>Alt15</b> | <b>Alt16</b> | <b>Alt17</b> |
|-----------------------------------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Densidade de potência de iluminação (W/m <sup>2</sup> )   | Zona 1 e 3          | 12           | <b>26</b>    | 12           | 12           | 12           | 12           |
|                                                           | Zona 2 e 4          | 12           | <b>26</b>    | 12           | 12           | 12           | 12           |
|                                                           | Zona 5              | 12           | <b>26</b>    | <b>0</b>     | 12           | 12           | 12           |
| Densidade de potência de equipamentos (W/m <sup>2</sup> ) | Zona 1 e 3          | 12           | 12           | 12           | 12           | <b>26</b>    | <b>15</b>    |
|                                                           | Zona 2 e 4          | 12           | 12           | 12           | 12           | <b>26</b>    | <b>25</b>    |
|                                                           | Zona 5              | 12           | 12           | <b>0</b>     | <b>60</b>    | <b>26</b>    | <b>3</b>     |
| Densidade de pessoas (pessoas/m <sup>2</sup> )            | Zona 1 e 3          | <b>1</b>     | 0,2          | 0,2          | 0,2          | 0,2          | 0,2          |
|                                                           | Zona 2 e 4          | <b>1</b>     | 0,2          | 0,2          | 0,2          | 0,2          | 0,2          |
|                                                           | Zona 5              | <b>1</b>     | 0,2          | <b>0</b>     | 0,2          | 0,2          | 0,2          |

Será verificada a influência da densidade de ocupação (DP) em cada zona térmica, assim como na edificação. Portanto, na alternativa 12 a densidade de ocupação será considerada 1 pessoa/m<sup>2</sup>. Serão extrapolados também os valores de densidade de iluminação (DPI) em todas as zonas, inclusive na zona central, adotando-se o valor de 26 W/m<sup>2</sup>, correspondente à alternativa 13. Também se optou em analisar diferentes cargas internas entre as zonas adjacentes com o objetivo de verificar o comportamento das mesmas. Portanto, as cargas térmicas de iluminação, densidade e ocupação das zonas perimetrais serão consideradas como a do modelo de referência, porém, a zona central será considerada sem carga térmica, conforme a alternativa 14. Na alternativa 15, será verificado o caso contrário, onde todas as zonas perimetrais são consideradas com densidades de carga como o modelo de referência, mas a densidade de potência de equipamentos da zona central é extrapolada para o valor de 60 W/m<sup>2</sup>. Na alternativa 16, todas as zonas térmicas passam a assumir o valor de 26 W/m<sup>2</sup> para a densidade de equipamentos (DPE). Por fim, na alternativa 17 são assumidos valores diferentes de densidade de carga de equipamentos para cada zona térmica: nas zonas térmicas voltadas para o norte e para o sul, a DPE será de 15 W/m<sup>2</sup>; nas zonas leste e oeste, a DPE será de 25 W/m<sup>2</sup>; e na zona central a DPE será baixa, no valor de 3 W/m<sup>2</sup>.

### 3.4.6 Variação da massa térmica interna

No metamodelo, a massa térmica interna (MT) é controlada por meio de um objeto independente, com o objetivo de representar as paredes, cobertura e piso contidos no interior de determinada zona térmica. Em edifícios comerciais, esta consideração é conveniente para

representar as divisórias entre salas comerciais, pelo fato de estas possuírem cargas térmicas internas muito semelhantes entre si. Desta forma, as salas podem ser consideradas localizadas em uma mesma zona térmica, onde as divisórias são consideradas apenas no objeto de massa térmica interna. As divisórias são consideradas construídas de parede pesada de 10 cm de concreto ( $220 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ). O dado de entrada no programa *EnergyPlus* é a área da superfície da parede ( $\text{m}^2$ ), portanto, no metamodelo basta informar a dimensão linear da parede, uma vez que o pé-direito já foi fornecido.

Na alternativa 17, foram acrescentadas divisórias no interior das zonas térmicas, representando salas comerciais de  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ , conforme pode-se observar na Figura 11. Como as paredes inseridas serão construídas com concreto, basta inserir no metamodelo a dimensão linear das paredes. Desta forma, o comprimento total das paredes internas da zona 1 e da zona 3 é de  $18 \text{ m}$ ; na zona 2 e na zona 4 o valor é de  $9 \text{ m}$ ; e na zona 5 as paredes somam o comprimento de  $124 \text{ m}$ . No *EnergyPlus* estes valores foram inseridos como dado de entrada após multiplicados pela altura do pé-direito de  $2,6 \text{ m}$ .

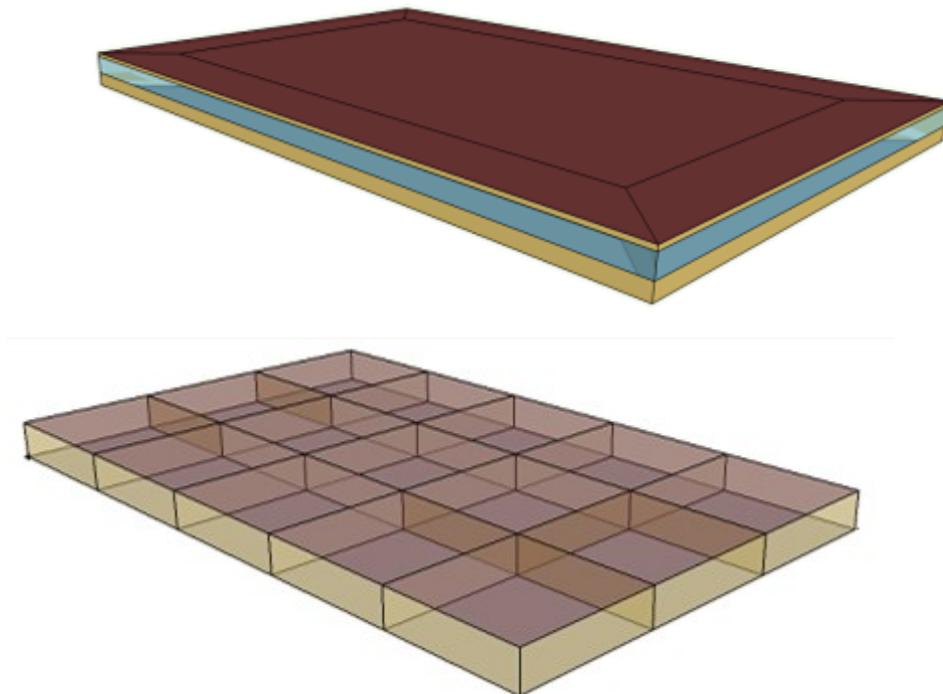


Figura 11 – Representação das divisórias no interior das zonas térmicas

### 3.4.7 Construção das paredes internas

No desenvolvimento do metamodelo, as paredes internas são definidas em gesso e adiabáticas. Portanto, optou-se em simular outros dois tipos de construção de parede, sendo estas não consideradas adiabáticas.

Na alternativa 19, a parede interna será modelada de gesso, assim como no modelo de referência, porém, as paredes serão consideradas não adiabáticas. Enquanto que na alternativa 20, as paredes internas de gesso foram substituídas pela construção de tijolo de 6 furos revestido com argamassa de 2,5 cm em ambos os lados, e também foi considerada não adiabática. Estes resultados obtidos por meio da simulação foram comparados com os obtidos com a aplicação do metamodelo.

### 3.4.8 Número de pavimentos

No metamodelo proposto por Versage (2015), cada zona térmica é avaliada separadamente. Frente a isso, optou-se em avaliar a influência do número de pavimentos da edificação no resultado de carga térmica comparando-se o resultado obtido por ponderação das zonas térmicas por meio da aplicação do metamodelo e pelo programa de simulação.

Na alternativa 21, o modelo de referência foi considerado com apenas um pavimento, e a alternativa 22 com quinze pavimentos, conforme mostra a Figura 12. Todas as alternativas analisadas podem ser observadas na Tabela 3-7.

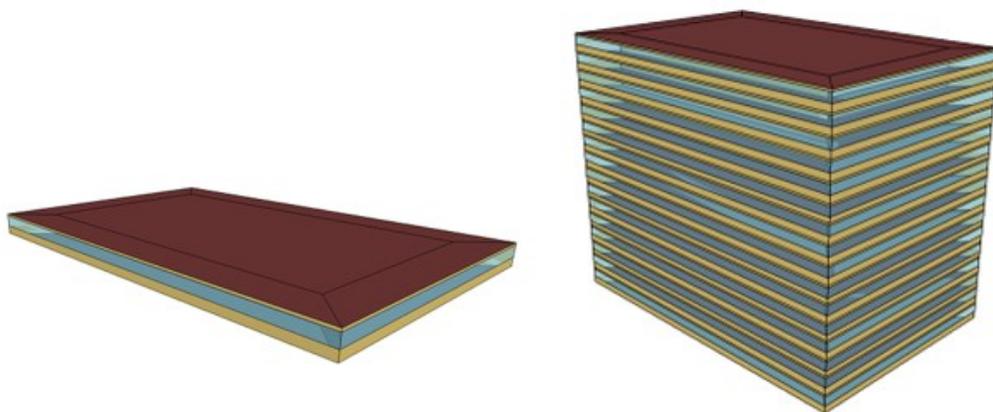


Figura 12 - Edificação com 1 pavimento e com 15 pavimentos

Tabela 3-7: Parâmetros variados

| Variações  | DPI<br>(W/m²) | DPE<br>(W/m²) | DF<br>(pessoas/m²) | WWR<br>(%) | FS   | Uvidro<br>(W/m².K) | Ucob<br>(W/m².K) | CTcob<br>(kJ/m².K) | αCob | Upar<br>(W/m².K) | CTpar<br>(kJ/m².K) | αPar | MT (m)   | Par Int | Nº Pav. |
|------------|---------------|---------------|--------------------|------------|------|--------------------|------------------|--------------------|------|------------------|--------------------|------|----------|---------|---------|
| Referência | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt1       | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,51             | 98                 | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt2       | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,51             | 98                 | 0,2  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt3       | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 4,84             | 240                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt4       | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 2,15             | 238                | 0,7  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt5       | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 2,11             | 21                 | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt6       | 12            | 12            | 0,2                | 25         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt7       | 12            | 12            | 0,2                | 75         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt8       | 12            | 12            | 0,2                | 50 (N/S)   | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt9       | 12            | 12            | 0,2                | 50 (L/O)   | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt10      | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt11      | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,2  | 1,59               | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt12      | 12            | 12            | 1,0                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt13      | 26            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt14      | 12/0*         | 12/0*         | 0,2/0*             | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt15      | 12            | 12/60*        | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt16      | 12            | 26            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt17      | 12            | 15/25/3       | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 5       |
| Alt18      | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 18/9/124 | adiab.  | 5       |
| Alt19      | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | gesso*  | 5       |
| Alt20      | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | tijolo* | 5       |
| Alt21      | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 1       |
| Alt22      | 12            | 12            | 0,2                | 50         | 0,87 | 5,7                | 3,31             | 220                | 0,2  | 2,44             | 220                | 0,7  | 0        | adiab.  | 15      |

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO METAMODELO

#### 4.1.1 Influência ao simular zonas térmicas individualmente

A Tabela 4-1 apresenta os resultados de carga térmica de resfriamento obtida por meio da simulação computacional da edificação, e também das simulações realizadas individualmente para cada zona térmica constituinte da edificação. Foi realizada uma simulação por meio do *EnergyPlus* para a edificação e, posteriormente, foram realizadas mais quinze simulações com o *EnergyPlus*: cinco para cada pavimento, considerando que o pavimento tipo repete-se três vezes.

Tabela 4-1: Comparação dos resultados de carga térmica de cada zona térmica obtidos por meio de simulação quando realizada no edifício e nas zonas térmicas individualmente.

| Pavimento         | Zona térmica | Edificação (kWh/m <sup>2</sup> ) | Por zona térmica (kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença (%) |
|-------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------------|---------------|
| Térreo            | Zona 1       | 81,88                            | 81,88                                  | 0,00          |
|                   | Zona 2       | 105,82                           | 105,51                                 | -0,29         |
|                   | Zona 3       | 103,69                           | 103,73                                 | 0,04          |
|                   | Zona 4       | 98,41                            | 98,40                                  | -0,01         |
|                   | Zona 5       | 58,19                            | 58,27                                  | 0,14          |
| Tipo              | Zona 1       | 128,34                           | 130,53                                 | 1,70          |
|                   | Zona 2       | 178,37                           | 182,13                                 | 2,11          |
|                   | Zona 3       | 178,37                           | 182,03                                 | 2,05          |
|                   | Zona 4       | 169,55                           | 173,24                                 | 2,17          |
|                   | Zona 5       | 110,64                           | 110,34                                 | -0,27         |
| Cobertura         | Zona 1       | 82,26                            | 83,79                                  | 1,85          |
|                   | Zona 2       | 106,56                           | 109,80                                 | 3,04          |
|                   | Zona 3       | 67,46                            | 69,51                                  | 3,04          |
|                   | Zona 4       | 162,79                           | 167,81                                 | 3,08          |
|                   | Zona 5       | 60,04                            | 59,72                                  | -0,53         |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>109,52</b>                    | <b>108,65</b>                          | <b>-0,07</b>  |

Observa-se que para ambos os casos, a zona térmica que apresentou maior resultado de carga térmica de resfriamento foi a zona 2 (leste) do pavimento tipo, com valor em torno de

180 kWh/m<sup>2</sup>. A maior diferença ao comparar-se os resultados obtidos, observa-se na zona 4 (oeste) do pavimento da cobertura, com resultado de carga térmica de resfriamento de 162,79 kWh/m<sup>2</sup>, obtido por meio da simulação computacional da edificação. O resultado da zona 4 (oeste), quando as zonas térmicas foram simuladas individualmente, foi 3,08% superior.

Ao ponderar-se os resultados das zonas térmicas obtém-se o resultado de carga térmica da edificação, no valor de 109,52 kWh/m<sup>2</sup>. Com o mesmo procedimento realizado para as zonas térmicas simuladas individualmente, o resultado foi de 108,65 kWh/m<sup>2</sup>. Ao comparar as diferenças zona a zona, nota-se uma diferença significativa. Na maioria dos casos, o resultado obtido quando a zona térmica foi simulada individualmente foi superior ao caso onde o edifício foi simulado. Porém, quando comparados os resultados da edificação total, a diferença é inferior.

A mesma análise foi realizada para representar uma edificação térrea, considerando como condições de contorno o piso em contato com o solo e o teto exposto ao exterior. Primeiramente, foi realizada a simulação da edificação e depois a simulação computacional de cinco zonas térmicas individualmente. Estes resultados podem ser observados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Comparação dos resultados de carga térmica de resfriamento com simulação completa de uma edificação térrea

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>Edificação (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Por zona térmica (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 74,13                                 | 74,17                                       | 0,05                 |
|                   | Zona 2              | 89,85                                 | 89,80                                       | -0,06                |
|                   | Zona 3              | 89,53                                 | 89,59                                       | 0,07                 |
|                   | Zona 4              | 86,81                                 | 86,85                                       | 0,05                 |
|                   | Zona 5              | 57,68                                 | 57,68                                       | 0,00                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>68,55</b>                          | <b>68,57</b>                                | <b>0,02</b>          |

Observa-se que os casos onde as zonas térmicas foram simuladas separadamente apresentaram valores de carga térmica de resfriamento muito semelhantes, sendo no total 0,02% superior do que quando todas as zonas térmicas foram simuladas simultaneamente, no valor de 68,57 kWh/m<sup>2</sup>.

Frente às duas análises realizadas anteriormente, pode-se afirmar que quando uma zona térmica é simulada individualmente o resultado é coerente com o obtido para a mesma zona térmica quando simulada a edificação com todas as zonas térmicas, como usualmente é realizada a análise. Portanto, pode-se concluir que o fato de o metamodelo analisar cada zona

térmica individualmente demonstra precisão nos resultados. O modelo com apenas um pavimento apresentou melhor precisão, comparado com o modelo com cinco pavimentos.

#### 4.1.2 Influência das paredes internas adiabáticas

Nesta simulação, as paredes internas, originalmente adiabáticas, passaram a ser consideradas não adiabáticas. A comparação foi realizada para edificações de um pavimento e cinco pavimentos, onde ambos os casos foram simulados. Os resultados podem ser observados nas Tabelas 4-3 e 4-4, respectivamente.

Tabela 4-3: Influência das paredes internas adiabáticas para a edificação térrea

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>Paredes não adiabáticas (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Paredes adiabáticas (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 50,60                                              | 74,13                                          | -31,75               |
|                   | Zona 2              | 64,16                                              | 89,85                                          | -28,60               |
|                   | Zona 3              | 62,81                                              | 89,53                                          | -29,85               |
|                   | Zona 4              | 61,46                                              | 86,81                                          | -29,20               |
|                   | Zona 5              | 34,80                                              | 57,68                                          | -39,67               |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>44,69</b>                                       | <b>68,55</b>                                   | <b>-34,80</b>        |

Ao analisar a edificação que apresenta um pavimento, nota-se grandes diferenças nos resultados de carga térmica de resfriamento, em torno de 30% superior em relação às zonas térmicas construídas com paredes internas não adiabáticas. A maior diferença é observada nos resultados da zona térmica 5, a zona central. Isto justifica-se pelo fato de a zona central ser constituída de quatro paredes internas, enquanto que as demais zonas apresentam três paredes internas e uma parede voltada para o exterior, onde através desta ocorre troca de carga térmica. Observa-se também que as diferenças são maiores nas zonas térmicas 1 (sul) e 3 (norte), por serem estas as zonas térmicas com maiores fachadas, portanto, com maior incidência de radiação solar. Este resultado explica-se pelo fato de quando as paredes internas são consideradas como adiabáticas, a carga térmica incidente em cada zona térmica permanece confinada na mesma. Quando as paredes não são adiabáticas, a carga interna dissipa-se entre as outras zonas térmicas com diferença de carga interna, ocorrendo o balanço térmico. Ao analisar a edificação com todas as zonas, a diferença também foi significativa. O resultado de carga de resfriamento foi de 44,69 kWh/m<sup>2</sup> para o caso com paredes não adiabáticas, sendo que para as paredes adiabáticas o valor foi 34,80% superior, no total de 68,55 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabela 4-4: Influência em considerar as paredes internas adiabáticas para uma edificação de cinco pavimento

| Pavimento         | Zona térmica | Paredes não adiabáticas (kWh/m <sup>2</sup> ) | Paredes adiabáticas (kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença (%) |
|-------------------|--------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|
| Térreo            | Zona 1       | 80,31                                         | 81,88                                     | -1,92         |
|                   | Zona 2       | 99,57                                         | 105,82                                    | -5,91         |
|                   | Zona 3       | 98,57                                         | 103,69                                    | -4,94         |
|                   | Zona 4       | 93,98                                         | 98,41                                     | -4,50         |
|                   | Zona 5       | 61,53                                         | 58,19                                     | 5,74          |
| Tipo              | Zona 1       | 134,27                                        | 128,34                                    | 4,62          |
|                   | Zona 2       | 168,11                                        | 178,37                                    | -5,75         |
|                   | Zona 3       | 167,84                                        | 178,37                                    | -5,90         |
|                   | Zona 4       | 158,81                                        | 169,55                                    | -6,34         |
|                   | Zona 5       | 119,60                                        | 110,64                                    | 8,10          |
| Cobertura         | Zona 1       | 80,82                                         | 82,26                                     | -1,76         |
|                   | Zona 2       | 99,39                                         | 106,56                                    | -6,73         |
|                   | Zona 3       | 62,92                                         | 67,46                                     | -6,73         |
|                   | Zona 4       | 153,57                                        | 162,79                                    | -5,67         |
|                   | Zona 5       | 63,74                                         | 60,04                                     | 6,17          |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>110,58</b>                                 | <b>108,65</b>                             | <b>1,78</b>   |

Quando é simulada uma edificação com cinco pavimentos, nota-se que a maior diferença entre os dois tipos de paredes internas encontra-se na zona 5 (zona central) do pavimento tipo, devido aos mesmos fatores expostos anteriormente. Além das paredes internas, o pavimento tipo também conta com o piso e o teto adiabáticos, uma vez que houve repetição deste pavimento três vezes (utilizou-se o objeto *multiplier* do *EnergyPlus*). Sendo assim, o valor de carga térmica de resfriamento obtido por meio da simulação nesta zona foi de 119,60 kWh/m<sup>2</sup>, e quando as paredes foram consideradas adiabáticas o valor obtido foi 8,10% inferior. Na zona central do pavimento térreo, apesar de possuir as quatro paredes internas e o teto adiabáticos, ocorrem trocas de calor através do piso, pelo fato de haver contato com o solo. De maneira semelhante, o pavimento da cobertura, possui o piso adiabático, porém, o teto permite entrada e saída de calor, uma vez que se encontra exposto às condições do sol e vento. A mínima diferença observa-se no pavimento da cobertura, na zona 1 (sul), na qual o valor de carga térmica de resfriamento foi 80,31 kWh/m<sup>2</sup> e, ao considerar as paredes como adiabáticas este valor é 1,92% superior. Isto porque a fachada sul é mais preservada da incidência de radiação solar. Ao analisar a edificação com todas as zonas térmicas, ponderando-se os valores das zonas

térmicas, o valor de carga térmica de resfriamento obtido foi de 110,58 kWh/m<sup>2</sup>, sendo que ao simular as paredes adiabáticas o valor reduziu 1,78%.

Pode-se observar que na edificação com menor número de pavimentos o valor da carga térmica de resfriamento por unidade de área é menor do que a edificação com cinco pavimento. Porém, nota-se maior diferença entre as duas maneiras de modelar as paredes internas (adiabáticas e não adiabáticas), na menor edificação. Isto porque quanto menor a edificação, maior é a influência do meio externo.

## 4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO POR VERSAGE (2015)

Neste item, foi realizada a comparação dos resultados obtidos por meio da aplicação do metamodelo com a simulação computacional do edifício de referência. Foi realizada a comparação dos resultados encontrados para cada uma das zonas térmicas separadamente. A comparação também foi realizada para cada pavimento, assim como da edificação. Os resultados de carga térmica de resfriamento obtidos para cada zona térmica por meio da simulação computacional e pela aplicação do metamodelo podem ser observados na Tabela 4-5. Os resultados obtidos para cada pavimento e para a edificação toda podem ser observados na Tabela 4-6.

Pode-se observar na Tabela 4-5, que as maiores diferenças se encontram nas zonas orientadas para o norte e sul em razão destas fachadas contarem com as maiores dimensões. Tendo em vista que o horário de ocupação da edificação é predominantemente no período da tarde, a zona norte possui o maior valor de carga térmica. Isto justifica também o fato de a fachada leste resultar em maior valor de carga térmica em comparação à zona oeste. A zona que corresponde a menor diferença é a zona central, uma vez que esta zona sofre pouca influência das condições externas. Porém, ao comparar-se a edificação no *EnergyPlus* com o metamodelo, por meio da ponderação dos resultados, a diferença encontrada foi de 4,31%, sendo superior para o caso mesurado por meio do metamodelo.

Observa-se na Tabela 4-6, que o pavimento com maior valor de carga térmica de resfriamento é o tipo, com 131,09 kWh/m<sup>2</sup>. É no pavimento tipo também que os resultados obtidos por meio do *EnergyPlus* e pelo metamodelo apresentaram maior semelhança, sendo o valor da 2,62% superior no metamodelo. Isto porque este pavimento possui todas as seis superfícies adiabáticas, não dissipando a carga incidente nas zonas térmicas pertencentes a este pavimento. O pavimento térreo e cobertura possuem o piso ou o teto que sofrem influências

externas, portanto possuem valores de carga térmica de resfriamento semelhantes, em torno de 70 kWh/m<sup>2</sup>. Por meio do metamodelo, obtiveram-se valores superiores de carga térmica de resfriamento: 6,79% para o pavimento térreo e 10,76% para a cobertura em comparação com o *EnergyPlus*.

Tabela 4-5- Comparação entre os resultados obtidos por meio do *EnergyPlus* e metamodelo por zona térmica

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 81,88                                            | 91,82                                     | 12,15                |
|                   | Zona 2              | 105,82                                           | 116,22                                    | 9,83                 |
|                   | Zona 3              | 103,69                                           | 127,65                                    | 23,11                |
|                   | Zona 4              | 98,41                                            | 110,96                                    | 12,75                |
|                   | Zona 5              | 58,19                                            | 56,44                                     | -3,00                |
| Tipo              | Zona 1              | 128,34                                           | 143,84                                    | 12,08                |
|                   | Zona 2              | 178,36                                           | 183,30                                    | 2,77                 |
|                   | Zona 3              | 178,36                                           | 205,98                                    | 15,48                |
|                   | Zona 4              | 166,79                                           | 176,37                                    | 5,74                 |
|                   | Zona 5              | 110,63                                           | 105,42                                    | -4,71                |
| Cobertura         | Zona 1              | 80,06                                            | 94,24                                     | 17,71                |
|                   | Zona 2              | 106,56                                           | 117,94                                    | 10,68                |
|                   | Zona 3              | 103,06                                           | 130,20                                    | 26,33                |
|                   | Zona 4              | 99,54                                            | 115,51                                    | 16,05                |
|                   | Zona 5              | 60,04                                            | 61,24                                     | 2,01                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>108,35</b>                                    | <b>113,02</b>                             | <b>4,31</b>          |

Tabela 4-6- Comparação entre os resultados obtidos por meio do *EnergyPlus* e metamodelo por pavimento

| <b>Pavimento</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo           | 73,77                                            | 78,78                                 | 6,79                 |
| Tipo             | 131,09                                           | 134,53                                | 2,62                 |
| Cobertura        | 74,71                                            | 82,74                                 | 10,76                |

### 4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS

#### 4.3.1 Variação da construção da parede externa

Na **alternativa 1**, alterou-se a construção da parede externa, antes composta de concreto com isolante ( $U_{par} = 2,44 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $C_t = 220 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$  e  $\alpha = 0,7$ ) para tijolo de 6 furos revestido com 2,5 cm de argamassa na superfície interna ( $U_{par} = 2,51 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $C_T = 98 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ). A absorptância solar das paredes externas manteve-se, no valor de 0,7. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com parede de tijolo e alta absorptância – Alternativa 1.

| Pavimento         | Zona térmica | <i>EnergyPlus</i><br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | Metamodelo<br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença<br>(%) |
|-------------------|--------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Térreo            | Zona 1       | 82,15                                      | 94,20                               | 14,67            |
|                   | Zona 2       | 107,03                                     | 119,10                              | 11,28            |
|                   | Zona 3       | 104,28                                     | 131,34                              | 25,94            |
|                   | Zona 4       | 98,06                                      | 114,43                              | 16,69            |
|                   | Zona 5       | 58,19                                      | 56,44                               | -3,00            |
| Tipo              | Zona 1       | 128,59                                     | 144,77                              | 12,59            |
|                   | Zona 2       | 179,63                                     | 184,25                              | 2,57             |
|                   | Zona 3       | 179,02                                     | 207,92                              | 16,14            |
|                   | Zona 4       | 166,75                                     | 178,38                              | 6,97             |
|                   | Zona 5       | 110,64                                     | 105,42                              | -4,72            |
| Cobertura         | Zona 1       | 80,08                                      | 95,38                               | 19,10            |
|                   | Zona 2       | 107,40                                     | 119,25                              | 11,03            |
|                   | Zona 3       | 103,36                                     | 132,24                              | 27,94            |
|                   | Zona 4       | 99,05                                      | 117,44                              | 18,56            |
|                   | Zona 5       | 60,03                                      | 61,24                               | 2,02             |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>108,53</b>                              | <b>113,76</b>                       | <b>4,82</b>      |

Observa-se que os resultados de carga térmica de resfriamento obtidos por meio do metamodelo geralmente foram maiores do que os observados nos dados de saída do programa *EnergyPlus*. Analisando cada zona térmica separadamente, a maior diferença entre os dois resultados obtidos pode ser observada na zona 3 (norte), do pavimento da cobertura. Isto pode ser explicado pelo fato de a fachada norte ter a maior área de parede externa e, além disso, recebe insolação na maior parte do dia. O resultado de carga de resfriamento foi em torno de

103,36 kWh/m<sup>2</sup> por meio da simulação computacional, valor 27,94% inferior ao obtido pelo metamodelo. As diferenças foram mínimas na zona central, em torno de 3%, isto porque é a única zona sem paredes externas, portanto não é influenciada pelas condições externas.

Analisando a edificação com um todo, a diferença entre os resultados das zonas térmicas é compensada. A diferença reduziu e o resultado obtido por meio do metamodelo (113,76 kWh/m<sup>2</sup>) foi 4,82% superior ao resultado fornecido pela simulação computacional (108,53 kWh/m<sup>2</sup>). Portanto, em relação ao edifício de referência, a diferença entre os resultados obtidos aumentou ao comparar *EnergyPlus* com metamodelo.

Na **alternativa 2**, a construção da parede externa foi semelhante a anterior ( $U_{par} = 2,51 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $C_T = 98 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ). Porém, a pintura foi alterada para cor clara ( $\alpha = 0,2$ ). Os resultados podem ser observados na Tabela 4-8.

Tabela 4-8: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com parede de tijolo e baixa absorvância solar – Alternativa 2.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença<br/>(%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 77,86                                            | 86,65                                     | 11,29                    |
|                   | Zona 2              | 98,34                                            | 107,30                                    | 9,10                     |
|                   | Zona 3              | 96,47                                            | 117,04                                    | 21,32                    |
|                   | Zona 4              | 92,15                                            | 103,68                                    | 12,52%                   |
|                   | Zona 5              | 58,18                                            | 56,44                                     | -2,99                    |
| Tipo              | Zona 1              | 120,85                                           | 132,55                                    | 9,69                     |
|                   | Zona 2              | 165,48                                           | 165,43                                    | -0,03                    |
|                   | Zona 3              | 165,20                                           | 184,74                                    | 11,82                    |
|                   | Zona 4              | 155,02                                           | 160,72                                    | 3,67                     |
|                   | Zona 5              | 110,62                                           | 105,42                                    | -4,70                    |
| Cobertura         | Zona 1              | 76,27                                            | 88,56                                     | 16,12                    |
|                   | Zona 2              | 99,24                                            | 108,55                                    | 9,38                     |
|                   | Zona 3              | 95,91                                            | 119,10                                    | 24,18                    |
|                   | Zona 4              | 93,32                                            | 107,39                                    | 15,09                    |
|                   | Zona 5              | 60,02                                            | 61,24                                     | 2,04                     |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>104,64</b>                                    | <b>107,65</b>                             | <b>2,88</b>              |

Com a redução da absorvância solar das paredes externas em relação à alternativa 1, o resultado de carga térmica de resfriamento reduziu 3,59% por simulação, e 5,41% por meio da aplicação do metamodelo. A redução do valor de carga térmica já era de se esperar, uma vez que o valor da absorvância reduziu e, portanto, uma porção maior da carga incidente na superfície reflete, comprovando a afirmação de Signor (1999) de que as cores da fachada

apresentam relação com o consumo. Com esta diferença é possível observar que o metamodelo também apresenta sensibilidade quanto a alteração da absorvância solar da superfície.

Ao analisar os resultados obtidos por cada zona térmica da alternativa 2, observa-se que a zona 3 (norte) da cobertura apresentou maior diferença entre os resultados obtidos. O valor de carga térmica de resfriamento por unidade de área desta zona térmica é 95,91 kWh/m<sup>2</sup>, sendo que este valor é 24,18% superior quando o resultado é obtido por meio do metamodelo, no valor de 119,10 kWh/m<sup>2</sup>.

Na análise da edificação observa-se que a diferença entre o resultado de carga térmica de resfriamento por meio da simulação e metamodelo não é significativa. O valor é de 104,64 kWh/m<sup>2</sup> quando simulada, sendo o resultado obtido por meio do metamodelo 2,88% superior. Conforme esperava-se, os resultados de carga térmica das zonas centrais mantiveram-se os mesmo que na alternativa 1, porque não possui paredes externas.

Na **alternativa 3**, a parede externa foi considerada com 10 cm de concreto, sendo a transmitância térmica correspondente de 4,84 W/m<sup>2</sup>K, capacidade térmica de 240 kJ/m<sup>2</sup>K, e absorvância solar de 0,7. Os resultados encontram-se na Tabela 4-9.

Tabela 4-9: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com parede de concreto e alta transmitância e absorvância solar - Alternativa 3.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença<br/>(%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 81,58                                            | 87,76                                     | 7,58                     |
|                   | Zona 2              | 107,95                                           | 113,64                                    | 5,27                     |
|                   | Zona 3              | 104,60                                           | 125,60                                    | 20,08                    |
|                   | Zona 4              | 97,74                                            | 107,35                                    | 9,82                     |
|                   | Zona 5              | 58,19                                            | 56,44                                     | -3,00                    |
| Tipo              | Zona 1              | 121,89                                           | 132,57                                    | 8,76                     |
|                   | Zona 2              | 171,84                                           | 172,53                                    | 0,40                     |
|                   | Zona 3              | 170,56                                           | 194,82                                    | 14,23                    |
|                   | Zona 4              | 158,50                                           | 164,83                                    | 3,99                     |
|                   | Zona 5              | 110,62                                           | 105,42                                    | -4,71                    |
| Cobertura         | Zona 1              | 79,57                                            | 90,82                                     | 14,15                    |
|                   | Zona 2              | 108,00                                           | 116,03                                    | 7,44                     |
|                   | Zona 3              | 103,51                                           | 128,71                                    | 24,35                    |
|                   | Zona 4              | 98,62                                            | 112,76                                    | 14,34                    |
|                   | Zona 5              | 60,02                                            | 61,24                                     | 2,03                     |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>106,62</b>                                    | <b>109,84</b>                             | <b>3,02</b>              |

Observa-se que com o aumento no valor da transmitância térmica, ocorreu uma redução no valor de carga térmica de resfriamento no valor de 1,6% por simulação computacional e 2,82% por meio do metamodelo com relação ao edifício de referência. Logo, o metamodelo mostrou-se mais sensível quanto ao aumento do valor de transmitância térmica. O aumento da transmitância térmica possibilita maior transferência de calor através das paredes quando houver diferença de temperatura do meio interno e externo. O sentido do fluxo depende da diferença de temperatura interna e externa, portanto o valor da carga interna no interior da edificação define se haverá ganho ou perda de calor. Conforme observado por Melo (2007), o aumento da transmitância das paredes pode proporcionar uma redução no consumo de energia anual da edificação, principalmente para os casos com alta densidade de carga interna, alto padrão de uso, WWR pequeno e absorvância solar baixa. Portanto, conforme Signor (1999) observou, a transmitância térmica da parede demonstrou-se com comportamento não-linear.

Na análise das zonas térmicas da alternativa 3, as maiores diferenças entre os resultados também podem ser observadas nas zonas 3 (norte), por onde ocorre a maior incidência de radiação solar. Além disso, a diferença entre os resultados foi significativa na maioria das zonas térmicas localizadas no pavimento da cobertura. Na zona 3 da cobertura, esta diferença equivale a 24,35%. Quando analisada a edificação com todas as zonas térmicas, o valor total encontrado foi de 101,12 kWh/m<sup>2</sup>. O resultado obtido por meio do metamodelo foi 3,02% superior ao do *EnergyPlus*, no valor de 109,34 kWh/m<sup>2</sup>.

Conclui-se que, dentre as alterações realizadas quanto às características das paredes, a que mais distanciou os resultados obtidos por meio do metamodelo e *EnergyPlus* foi a alternativa 1 (4,82%). Em seguida, a maior diferença foi observada com o aumento da transmitância térmica (3,02%) e, por último, os valores mais semelhantes encontrados foram para o caso da redução com a absorvância solar (2,88%). Nos dois últimos casos, a diferença entre os resultados foi inferior à diferença observada quando o edifício de referência foi modelado. Pode-se inferir que quanto mais as paredes externas permitem a troca de calor, a confiabilidade do metamodelo diminui em relação às simulações executadas por meio do *EnergyPlus*. Porém, a diferença encontrada não foi significativa em nenhuma das alternativas.

#### 4.3.2 Variação da construção da cobertura

Nesta alternativa, correspondente à **alternativa 4**, a construção da cobertura foi alterada para laje maciça, câmara de ar e telha de barro. Sendo assim, a nova construção possui valores de transmitância térmica e capacidade térmica de 2,15 W/m<sup>2</sup>K e 238 kJ/m<sup>2</sup>K,

respectivamente. A absorptância solar adotada aumentou para 0,7. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-10.

Tabela 4-10- Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com cobertura de telha de barro e alta absorptância solar – Alternativa 4.

| <b>Pavimento</b>        | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo                  | Zona 1              | 81,86                                 | 91,82                                 | 12,17                |
|                         | Zona 2              | 105,66                                | 116,22                                | 9,99                 |
|                         | Zona 3              | 103,68                                | 127,65                                | 23,13                |
|                         | Zona 4              | 98,38                                 | 110,96                                | 12,79                |
|                         | Zona 5              | 58,28                                 | 56,44                                 | -3,16                |
| Tipo                    | Zona 1              | 128,11                                | 143,84                                | 12,27                |
|                         | Zona 2              | 178,04                                | 183,30                                | 2,95                 |
|                         | Zona 3              | 178,16                                | 205,98                                | 15,62                |
|                         | Zona 4              | 166,53                                | 176,37                                | 5,91                 |
|                         | Zona 5              | 110,51                                | 105,42                                | -4,61                |
| Cobertura               | Zona 1              | 118,45                                | 147,70                                | 24,70                |
|                         | Zona 2              | 152,04                                | 184,15                                | 21,12                |
|                         | Zona 3              | 150,21                                | 200,11                                | 33,22                |
|                         | Zona 4              | 144,75                                | 179,51                                | 24,02                |
|                         | Zona 5              | 102,57                                | 124,47                                | 21,35                |
| <b>Edificação Total</b> |                     | <b>116,86</b>                         | <b>125,65</b>                         | <b>7,52</b>          |

Nesta alternativa, onde o valor de transmitância térmica reduziu, e o valor da absorptância solar aumentou, nota-se o aumento do valor de carga térmica de resfriamento em relação ao edifício de referência. O metamodelo apresentou maior sensibilidade a tais mudanças, com o aumento de 11,17%. Enquanto que, por simulação computacional, o aumento foi de 7,86%. Esta conclusão também foi comprovada por Santana (2006), onde a carga térmica aumentou com a variação da absorptância da cobertura, principalmente no pavimento da cobertura.

Pode-se observar que a maior diferença entre os resultados obtidos por meio do *EnergyPlus* e do metamodelo encontra-se na zona 3 (norte) do pavimento da cobertura. A diferença justifica-se pelo fato de a zona 3 (norte) permanecer mais horas do dia exposta a incidência da radiação solar. Nesta zona, o resultado de carga térmica de resfriamento com a simulação computacional é de 150,21 kWh/m<sup>2</sup>. Com o metamodelo, o resultado foi 33,22% superior que a simulação computacional, no valor de 200,11 kWh/m<sup>2</sup>. As demais zonas térmicas da cobertura também obtiveram diferenças significativas entre os resultados obtidos.

Apesar de a diferença ser significativa entre as zonas térmicas correspondentes, ao analisar a edificação com todas as zonas térmicas, a diferença encontrada entre os resultados é amenizada. Observa-se que o valor de carga térmica de resfriamento por unidade de área é de 116,86 kWh/m<sup>2</sup>, sendo que por meio da aplicação do metamodelo, este valor é 7,52% superior. Observa-se, portanto, um distanciamento entre os resultados encontrados com as alterações realizadas, quando o edifício se tornou mais vulnerável às condições externas.

Na **alternativa 5**, a cobertura foi substituída por telha de fibrocimento e forro de madeira. Em comparação com o modelo de referência, nota-se a redução da transmitância e capacidade térmica. Quanto à alternativa 4, houve a redução da capacidade térmica e da absorptância, nos valores de, respectivamente, 21 kJ/m<sup>2</sup>.K e 0,2. Os resultados são apresentados na Tabela 4-11.

Tabela 4-11: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com cobertura de telha de fibrocimento e baixa absorptância solar – Alternativa 5

| <b>Pavimento</b>        | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo                  | Zona 1              | 81,87                                 | 91,82                                 | 12,16                |
|                         | Zona 2              | 105,80                                | 116,22                                | 9,85                 |
|                         | Zona 3              | 103,68                                | 127,65                                | 23,12                |
|                         | Zona 4              | 98,40                                 | 110,96                                | 12,77                |
|                         | Zona 5              | 58,21                                 | 56,44                                 | -3,04                |
| Tipo                    | Zona 1              | 128,28                                | 143,84                                | 12,13                |
|                         | Zona 2              | 178,30                                | 183,30                                | 2,80                 |
|                         | Zona 3              | 178,29                                | 205,98                                | 15,53                |
|                         | Zona 4              | 166,71                                | 176,37                                | 5,79                 |
|                         | Zona 5              | 110,61                                | 105,42                                | -4,69                |
| Cobertura               | Zona 1              | 104,87                                | 118,64                                | 13,13                |
|                         | Zona 2              | 140,64                                | 148,78                                | 5,79                 |
|                         | Zona 3              | 139,31                                | 164,54                                | 18,11                |
|                         | Zona 4              | 132,77                                | 144,86                                | 9,11                 |
|                         | Zona 5              | 74,15                                 | 77,76                                 | 4,87                 |
| <b>Edificação Total</b> |                     | <b>112,59</b>                         | <b>117,40</b>                         | <b>4,27</b>          |

Observa-se que, em relação ao edifício de referência o valor de carga térmica de resfriamento aumentou 3,91% por simulação, e 3,87% pelo metamodelo, devido à alteração do tipo da cobertura. E em relação à alternativa 4, reduziu-se o valor da absorptância solar, e os resultados de carga térmica reduziram 3,66% e 11,17%, por simulação e pelo metamodelo, respectivamente.

Analisando cada zona térmica da alternativa 5, a maior diferença entre os dois resultados obtidos pode ser observada na zona 3 (norte), do pavimento térreo. O resultado de carga de resfriamento foi em torno de 103,68 kWh/m<sup>2</sup>, por meio da simulação computacional, resultado 23,12% inferior ao obtido por meio do metamodelo. Em seguida, a maior diferença foi observada na zona 3 do pavimento tipo e na zona 3 da cobertura. Isto pode ser explicado pelo fato de as características adotadas para a cobertura permitir pouca incidência de carga térmica.

Analisando a edificação com um todo, a diferença entre os resultados das zonas térmicas é compensada. A diferença reduziu, e o resultado obtido por meio do metamodelo (1117,40 kWh/m<sup>2</sup>) foi 4,27% superior ao resultado fornecido pela simulação computacional (112,59 kWh/m<sup>2</sup>).

### **4.3.3 Variação dos percentuais de abertura das fachadas**

A **alternativa 6** consiste em reduzir o percentual de abertura da fachada de 50% para 25%. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-12.

A redução no valor do WWR tem como consequência a redução da carga térmica de resfriamento em todas as zonas térmicas, em relação ao edifício de referência (WWR = 50%), com exceção da zona 5 (central) que não possui área de abertura e, portanto, o resultado permanece igual.

As maiores diferenças são observadas nas fachadas voltadas para o norte (zona 3), por corresponder a maior fachada e, conseqüentemente, maior área de abertura. A zona 3, do pavimento da cobertura apresenta carga térmica de resfriamento de 88,23 kWh/m<sup>2</sup>, porém, por meio do metamodelo, o valor encontrado foi de 104,23 kWh/m<sup>2</sup>, correspondendo a uma diferença de 18,14% nos resultados. Porém, esta diferença é compensada pelas demais zonas térmicas quando realizada a análise da edificação, com o resultado de 100,06 kWh/m<sup>2</sup>, valor 0,26% inferior ao resultado obtido com a aplicação do metamodelo.

Tabela 4-12: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com WWR=25% - Alternativa 6

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 72,78                                 | 72,83                                 | 0,07                 |
|                   | Zona 2              | 90,32                                 | 91,95                                 | 1,81                 |
|                   | Zona 3              | 88,27                                 | 98,46                                 | 11,54                |
|                   | Zona 4              | 83,84                                 | 86,59                                 | 3,28                 |
|                   | Zona 5              | 58,18                                 | 56,44                                 | -2,99                |
| Tipo              | Zona 1              | 112,52                                | 115,45                                | 2,60                 |
|                   | Zona 2              | 148,38                                | 147,05                                | -0,90                |
|                   | Zona 3              | 148,20                                | 160,87                                | 8,55                 |
|                   | Zona 4              | 139,19                                | 139,32                                | 0,10                 |
|                   | Zona 5              | 110,60                                | 105,42                                | -4,68                |
| Cobertura         | Zona 1              | 72,41                                 | 77,54                                 | 7,09                 |
|                   | Zona 2              | 91,69                                 | 96,88                                 | 5,66                 |
|                   | Zona 3              | 88,23                                 | 104,23                                | 18,14                |
|                   | Zona 4              | 85,98                                 | 93,52                                 | 8,76                 |
|                   | Zona 5              | 60,02                                 | 61,24                                 | 2,04                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>100,06</b>                         | <b>100,32</b>                         | <b>0,26</b>          |

Na **alternativa 7**, o valor do WWR aumentou de 50% para 75%. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-13.

Ao aumentar o valor do WWR, o valor de carga térmica de resfriamento aumentou em comparação com o edifício de referência. Pode-se observar que quanto mais exposto ao ambiente externo encontra-se o ambiente, maiores são as diferenças entre os resultados do metamodelo e da simulação computacional obtidos. Gómez e Lamberts (1995) chegaram à mesma conclusão, afirmando que as alternativas com maiores áreas de janela apresentaram maiores consumo de energia elétrica. Diferenças significativas podem ser observadas nas zonas com grandes áreas de fachada externa, nas zonas voltadas para o norte e sul. Portanto, nas zonas 3 (norte), a diferença é ainda maior, devido à maior incidência de radiação solar. A zona 4, voltada para o oeste, também apresentou diferenças semelhantes. As zonas centrais apresentaram pouca diferença por tratar-se da zona térmica sem aberturas. Exceto as zonas centrais (zonas 5), todas as outras zonas térmicas quando comparadas com as zonas térmicas correspondentes, apresentaram diferenças significativas nos seus resultados. Apesar da discrepância entre os resultados, ao ponderá-los conforme as zonas térmicas, a edificação obteve valor de carga térmica de resfriamento de 114,74 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que pelo

metamodelo o resultado foi de 125,49 kWh/m<sup>2</sup>. Observa-se uma diferença de 9,36%. Esta diferença é maior em relação às edificações com menores valores de WWR. Conforme pode-se observar, quanto menor o valor do WWR, ou seja, quanto menos exposto encontram-se os ambientes às condições externas, a aplicação do metamodelo para predizer o valor de carga térmica de resfriamento oferece resultados mais satisfatórios.

Tabela 4-13: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com WWR=75% - Alternativa 7

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 89,61                                 | 110,32                                | 23,11                |
|                   | Zona 2              | 118,62                                | 139,72                                | 17,80                |
|                   | Zona 3              | 116,45                                | 158,01                                | 35,69                |
|                   | Zona 4              | 110,22                                | 135,19                                | 22,65%               |
|                   | Zona 5              | 58,19                                 | 56,44                                 | -3,01                |
| Tipo              | Zona 1              | 140,38                                | 171,32                                | 22,05                |
|                   | Zona 2              | 201,18                                | 217,91                                | 8,32                 |
|                   | Zona 3              | 201,06                                | 251,94                                | 25,30                |
|                   | Zona 4              | 187,01                                | 212,91                                | 13,85                |
|                   | Zona 5              | 110,70                                | 105,42                                | -4,77                |
| Cobertura         | Zona 1              | 86,30                                 | 109,22                                | 26,55                |
|                   | Zona 2              | 118,80                                | 136,64                                | 15,02                |
|                   | Zona 3              | 115,34                                | 155,26                                | 34,61                |
|                   | Zona 4              | 110,31                                | 135,73                                | 23,05                |
|                   | Zona 5              | 60,05                                 | 61,24                                 | 1,99                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>114,74</b>                         | <b>125,49</b>                         | <b>9,36</b>          |

Na **alternativa 8**, somente na zona 1 (sul) e na zona 3 (norte) foram inseridas aberturas de fachada, nas quais o WWR é de 50%. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-14.

Foi possível observar grande influência no consumo de energia elétrica quanto a orientação das aberturas (MOTTA, 2007). Pode-se observar que as maiores diferenças entre os resultados se encontram nas zonas térmicas voltadas para o norte e sul, afinal são as maiores fachadas, e onde existem aberturas de fachada. Dentre elas, a zona 1 (sul) localizada no pavimento térreo foi a que apresentou a maior diferença: 24,57%. Por meio da simulação computacional, o resultado obtido foi de 81,83 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto o metamodelo resultou em 61,72 kWh/m<sup>2</sup>. Porém, por meio da ponderação das zonas térmicas para predizer o valor da

carga térmica de resfriamento por unidade de área da edificação, o valor de carga térmica obtido pelo programa e *EnergyPlus* foi de 99,90 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que por meio do metamodelo foi 9,44% inferior, no valor de 90,47 kWh/m<sup>2</sup>. A diferença é justificada pelo fato de as aberturas serem muito grandes, portanto, permite grande incidência de calor através delas.

Tabela 4-14: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com WWR=50% nas fachadas norte e sul – Alternativa 8

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 81,83                                 | 91,82                                 | 12,21                |
|                   | Zona 2              | 72,20                                 | 71,99                                 | -0,29                |
|                   | Zona 3              | 103,65                                | 127,65                                | 23,16                |
|                   | Zona 4              | 66,09                                 | 68,21                                 | 3,21                 |
|                   | Zona 5              | 58,18                                 | 56,44                                 | -2,99                |
| Tipo              | Zona 1              | 128,22                                | 143,84                                | 12,18                |
|                   | Zona 2              | 108,96                                | 118,57                                | 8,82                 |
|                   | Zona 3              | 178,23                                | 205,98                                | 15,57                |
|                   | Zona 4              | 101,77                                | 112,29                                | 10,34                |
|                   | Zona 5              | 110,58                                | 105,42                                | -4,67                |
| Cobertura         | Zona 1              | 80,03                                 | 94,24                                 | 17,75                |
|                   | Zona 2              | 74,21                                 | 75,27                                 | 1,43                 |
|                   | Zona 3              | 103,00                                | 130,20                                | 26,40                |
|                   | Zona 4              | 69,43                                 | 71,88                                 | 3,51                 |
|                   | Zona 5              | 60,01                                 | 61,24                                 | 2,05                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>99,90</b>                          | <b>104,18</b>                         | <b>4,28</b>          |

A **alternativa 9** possui valor de WWR de 50% nas fachadas leste e oeste. Os resultados estão expostos na Tabela 4-15.

Conforme pode ser observado, a grande diferença entre os resultados corresponde à fachada oeste, pois a intensidade da radiação solar encontra-se no pico durante a tarde. Observa-se a maior diferença na zona 4 (oeste) do pavimento da cobertura, com valor de carga térmica de 99,54 kWh/m<sup>2</sup> para o programa de simulação e resultado por meio do metamodelo 16,05% superior (115,51 kWh/m<sup>2</sup>). Porém, ao ponderar-se os resultados, a diferença entre os dois resultados da carga térmica de resfriamento da edificação não significativo, no total de 1,28%. O fato de as maiores aberturas serem retiradas justifica esta diferença insignificante. Na alternativa com abertura de janela voltada para as orientações norte e sul, apresentaram maiores

valores de carga térmica de resfriamento, assim como observou-se maiores diferenças entre o metamodelo e a simulação.

Tabela 4-15: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com WWR=50% nas fachadas leste e oeste – Alternativa 9

| Pavimento         | Zona térmica | EnergyPlus (kWh/m <sup>2</sup> ) | Metamodelo (kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença (%) |
|-------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| Térreo            | Zona 1       | 62,11                            | 62,59                            | 0,76          |
|                   | Zona 2       | 105,82                           | 116,22                           | 9,83          |
|                   | Zona 3       | 69,37                            | 71,27                            | 2,74          |
|                   | Zona 4       | 98,41                            | 110,96                           | 12,75         |
|                   | Zona 5       | 58,19                            | 56,44                            | -3,00         |
| Tipo              | Zona 1       | 91,54                            | 102,10                           | 11,53         |
|                   | Zona 2       | 178,37                           | 183,30                           | 2,76          |
|                   | Zona 3       | 108,53                           | 117,77                           | 8,51          |
|                   | Zona 4       | 166,79                           | 176,37                           | 5,74          |
|                   | Zona 5       | 110,64                           | 105,42                           | -4,72         |
| Cobertura         | Zona 1       | 63,29                            | 65,50                            | 3,49          |
|                   | Zona 2       | 106,56                           | 117,94                           | 10,68         |
|                   | Zona 3       | 71,24                            | 74,87                            | 5,10          |
|                   | Zona 4       | 99,54                            | 115,51                           | 16,05         |
|                   | Zona 5       | 60,03                            | 61,24                            | 2,02          |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>97,80</b>                     | <b>99,05</b>                     | <b>1,28</b>   |

#### 4.3.4 A modelagem dos vidros

Na **alternativa 10**, o vidro foi modelado através do método detalhado no programa *EnergyPlus*. Tendo em vista que na aplicação do metamodelo, os vidros são modelados pelo método simplificado, comparar os resultados obtidos por meio da aplicação do metamodelo com a simulação computacional significa comparar as duas condições de entrada disponíveis no *EnergyPlus*: método simplificado e método detalhado. O vidro inserido corresponde a um vidro simples, como o modelo original (FS= 0,87 e Uvidro = 5,7 W/m<sup>2</sup>.K). Os resultados podem ser observados na Tabela 4-16.

Tabela 4-16: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com vidro simples – Alternativa 10.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 79,80                                 | 91,72                                 | 14,95                |
|                   | Zona 2              | 102,70                                | 116,15                                | 13,10                |
|                   | Zona 3              | 99,67                                 | 127,71                                | 28,14                |
|                   | Zona 4              | 94,81                                 | 110,87                                | 16,94                |
|                   | Zona 5              | 58,19                                 | 56,44                                 | -3,00                |
| Tipo              | Zona 1              | 124,63                                | 143,17                                | 14,88                |
|                   | Zona 2              | 172,92                                | 182,53                                | 5,56                 |
|                   | Zona 3              | 171,84                                | 205,33                                | 19,49                |
|                   | Zona 4              | 161,23                                | 175,60                                | 8,92                 |
|                   | Zona 5              | 110,63                                | 105,42                                | -4,72                |
| Cobertura         | Zona 1              | 78,06                                 | 94,05                                 | 20,49                |
|                   | Zona 2              | 103,37                                | 117,75                                | 13,91                |
|                   | Zona 3              | 99,08                                 | 130,11                                | 31,33                |
|                   | Zona 4              | 96,09                                 | 115,32                                | 20,02                |
|                   | Zona 5              | 60,03                                 | 61,24                                 | 2,02                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>106,55</b>                         | <b>112,84</b>                         | <b>5,90</b>          |

Grandes diferenças podem ser notadas nas fachadas norte e sul (zona 1 e zona 3), as quais correspondem às maiores aberturas. Entre elas, a maior diferença entre os resultados encontrados é da zona 3 (norte) do pavimento da cobertura. O resultado de carga térmica correspondente é de 99,08 kWh/m<sup>2</sup>, porém o resultado obtido por meio do metamodelo é 31,33% maior, no total de 130,11 kWh/m<sup>2</sup>. Na zona 5 (central), a diferença é pequena porque não tem aberturas. O valor de carga térmica de resfriamento obtido após realizada a ponderação, afim de obter o resultado de carga térmica para a edificação, é de 106,55 kWh/m<sup>2</sup>.K, sendo este valor 5,90% superior no caso em que edificação é modelada por meio do metamodelo. Portanto, a diferença entre as duas maneiras de modelagem foi pequena, considerando que por meio do *EnergyPlus* o vidro é modelado pelo objeto detalhado, e no metamodelo pelo método simplificado. Este resultado confronta com o encontrado no estudo de Sorgato *et al.* (2014), onde foi observado que o objeto escolhido para a entrada de dados influencia significativamente nos resultados.

O mesmo procedimento descrito anteriormente foi realizado na análise da **alternativa 11**, porém, o vidro modelado foi o vidro duplo. O fator solar do vidro duplo é 0,20 e a transmitância solar do vidro é 1,59 W/m<sup>2</sup>.K. Os resultados podem ser observados Tabela 4-17.

Tabela 4-17: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a alternativa com vidro duplo – Alternativa 11.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença<br/>(%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 69,11                                            | 63,84                                     | -7,62                    |
|                   | Zona 2              | 80,88                                            | 75,08                                     | -7,17                    |
|                   | Zona 3              | 80,91                                            | 74,59                                     | -7,81                    |
|                   | Zona 4              | 78,49                                            | 72,45                                     | -7,70                    |
|                   | Zona 5              | 58,18                                            | 56,44                                     | -2,99                    |
| Tipo              | Zona 1              | 107,43                                           | 100,30                                    | -6,64                    |
|                   | Zona 2              | 132,93                                           | 119,60                                    | -10,03                   |
|                   | Zona 3              | 133,28                                           | 120,65                                    | -9,48                    |
|                   | Zona 4              | 126,20                                           | 115,15                                    | -8,75                    |
|                   | Zona 5              | 110,60                                           | 105,42                                    | -4,68                    |
| Cobertura         | Zona 1              | 69,33                                            | 67,78                                     | -2,23                    |
|                   | Zona 2              | 82,89                                            | 79,62                                     | -3,94                    |
|                   | Zona 3              | 81,09                                            | 79,72                                     | -1,69                    |
|                   | Zona 4              | 80,66                                            | 77,56                                     | -3,85                    |
|                   | Zona 5              | 60,01                                            | 61,24                                     | 2,05                     |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>96,23</b>                                     | <b>91,04</b>                              | <b>-5,39</b>             |

Conforme observado, as maiores diferenças encontram-se nas zonas térmicas localizadas no pavimento tipo, em especial a zona 2 (leste), com o valor de 132,93 kWh/m<sup>2</sup>. Este valor é 10,03% inferior ao modelar tal vidro por meio do metamodelo. Porém, não houve discrepância para nenhuma das zonas térmicas nos resultados obtidos. Ponderando-se para a edificação, obteve-se o resultado de 96,23 kWh/m<sup>2</sup> para a simulação por meio do programa *EnergyPlus*, enquanto o resultado do metamodelo obtido foi de 91,04 kWh/m<sup>2</sup>, sendo 5,39% inferior. Levando em consideração que no metamodelo a modelagem é realizada por meio do objeto simplificado, observou-se que os resultados encontrados na alternativa 11, estão de acordo com o trabalho de Sorgato *et al.* (2014), o qual demonstrou que quando os dados de entrada são inseridos por meio do objeto simplificado os resultados de consumo são inferiores do que quando simulados pelo objeto detalhado. Porém, na alternativa 10, isto não foi observado, uma vez que os resultados de carga térmica encontrados por meio do *EnergyPlus* (método detalhado), foram inferiores ao metamodelo (método simplificado). Porém, em ambos os casos, a diferença entre os resultados não foi significativa, podendo-se inferir que, apesar de o metamodelo modelar os vidros por meio do método simplificado, o resultado é preciso, visto que o resultado oferecido é similar ao do caso simulado.

### 4.3.5 Variação das cargas térmicas internas

A **alternativa 12** consiste em alterar a densidade de pessoas de 0,2 pessoas/m<sup>2</sup> para 1,0 pessoas/m<sup>2</sup>. Os resultados estão expostos na Tabela 4-18.

Tabela 4-18: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para densidade de ocupação – Alternativa 12.

| Pavimento         | Zona térmica | <i>EnergyPlus</i><br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | Metamodelo<br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença<br>(%) |
|-------------------|--------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Térreo            | Zona 1       | 239,96                                     | 249,37                              | 3,92             |
|                   | Zona 2       | 280,23                                     | 293,31                              | 4,67             |
|                   | Zona 3       | 271,42                                     | 297,90                              | 9,76             |
|                   | Zona 4       | 267,43                                     | 281,29                              | 5,18             |
|                   | Zona 5       | 199,02                                     | 203,77                              | 2,39             |
| Tipo              | Zona 1       | 332,37                                     | 337,83                              | 1,64             |
|                   | Zona 2       | 401,85                                     | 402,27                              | 0,11             |
|                   | Zona 3       | 403,05                                     | 415,50                              | 3,09             |
|                   | Zona 4       | 381,73                                     | 386,12                              | 1,15             |
|                   | Zona 5       | 317,00                                     | 311,40                              | -1,76            |
| Cobertura         | Zona 1       | 246,84                                     | 262,48                              | 6,33             |
|                   | Zona 2       | 286,79                                     | 307,55                              | 7,24             |
|                   | Zona 3       | 279,03                                     | 314,35                              | 12,66            |
|                   | Zona 4       | 274,38                                     | 299,00                              | 8,97             |
|                   | Zona 5       | 207,66                                     | 222,36                              | 7,08             |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>296,49</b>                              | <b>301,68</b>                       | <b>1,75</b>      |

Conforme observado, a zona térmica que apresenta a maior diferença entre os resultados é a zona 3 (norte) do pavimento da cobertura, com valor 12,66% inferior para o resultado obtido por meio da simulação. Portanto, nesta zona encontrou-se o resultado de carga térmica no valor de 279,03 kWh/m<sup>2</sup> por meio da simulação computacional, e 314,35 kWh/m<sup>2</sup> com a aplicação do metamodelo. Ao analisar a edificação, o resultado de carga térmica de resfriamento por unidade de área obtido por meio da simulação foi no valor de 296,49 kWh/m<sup>2</sup>, quase três vezes maior do que o valor do edifício de referência, onde a densidade de ocupação é de 0,2 pessoas/m<sup>2</sup>. Comparando-se os resultados obtidos por meio da aplicação do metamodelo com os resultados da simulação computacional, obteve-se a diferença de 1,75% maior para os resultados do metamodelo, onde o valor encontrado foi de 301,68 kWh/m<sup>2</sup>. Portanto, a diferença entre os resultados obtidos foi inferior quando o número de pessoas por unidade de área aumentou.

Na **alternativa 13**, o valor da densidade de potência de iluminação interna foi alterado de 12 W/m<sup>2</sup> para 26 W/m<sup>2</sup> em todas as zonas térmicas. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-19.

Tabela 4-19: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para densidade de carga de iluminação – Alternativa 13.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 95,61                                 | 105,05                                | 9,88                 |
|                   | Zona 2              | 119,84                                | 131,19                                | 9,47                 |
|                   | Zona 3              | 117,67                                | 141,71                                | 20,43                |
|                   | Zona 4              | 112,15                                | 125,36                                | 11,78                |
|                   | Zona 5              | 72,17                                 | 75,47                                 | 4,58                 |
| Tipo              | Zona 1              | 148,25                                | 162,87                                | 9,86                 |
|                   | Zona 2              | 198,34                                | 204,95                                | 3,33                 |
|                   | Zona 3              | 198,63                                | 226,22                                | 13,89                |
|                   | Zona 4              | 186,57                                | 197,35                                | 5,78                 |
|                   | Zona 5              | 142,97                                | 140,25                                | -1,91                |
| Cobertura         | Zona 1              | 92,74                                 | 108,68                                | 17,19                |
|                   | Zona 2              | 120,20                                | 134,42                                | 11,84                |
|                   | Zona 3              | 117,14                                | 146,04                                | 24,67                |
|                   | Zona 4              | 112,80                                | 131,49                                | 16,57                |
|                   | Zona 5              | 73,12                                 | 79,05                                 | 8,10                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>130,17</b>                         | <b>137,14</b>                         | <b>5,36</b>          |

As maiores diferenças podem ser observadas nas zonas térmicas voltadas para o norte (zona 3). No pavimento da cobertura, na zona 3, onde a diferença observada é a maior, o valor de carga térmica de resfriamento obtido por meio do *EnergyPlus* é 117,14 kWh/m<sup>2</sup> e pelo metamodelo este valor é de 146,04 kWh/m<sup>2</sup>, portanto a diferença é de 24,67%. Na edificação, o resultado obtido por ponderação das zonas térmicas é de 130,17 kWh/m<sup>2</sup>, sendo 5,36% superior quando o resultado foi obtido pelo metamodelo. Assim, pode-se concluir que como aumento da densidade de iluminação o valor de carga térmica de resfriamento na edificação aumentou, assim como a diferença entre os resultados obtidos por simulação e pelo metamodelo.

Na **alternativa 14**, a zona central foi considerada sem carga de iluminação, equipamentos e ocupação. As demais zonas térmicas permanecem com densidade de potência de iluminação e equipamento de 12 W/m<sup>2</sup>K, e densidade de ocupação de 0,2 pessoas/m<sup>2</sup>. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 4-20.

Tabela 4-20: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a zona central sem carga interna – Alternativa 14.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença<br/>(%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 81,85                                            | 91,82                                     | 12,18                    |
|                   | Zona 2              | 105,70                                           | 116,22                                    | 9,95                     |
|                   | Zona 3              | 103,67                                           | 127,65                                    | 23,13                    |
|                   | Zona 4              | 98,38                                            | 110,96                                    | 12,80                    |
|                   | Zona 5              | 1,44                                             | 5,42                                      | 276,26                   |
| Tipo              | Zona 1              | 128,16                                           | 143,84                                    | 12,23                    |
|                   | Zona 2              | 178,11                                           | 183,30                                    | 2,91                     |
|                   | Zona 3              | 178,19                                           | 205,98                                    | 15,59                    |
|                   | Zona 4              | 166,58                                           | 176,37                                    | 5,88                     |
|                   | Zona 5              | 1,29                                             | 11,37                                     | 778,44                   |
| Cobertura         | Zona 1              | 80,13                                            | 94,24                                     | 17,61                    |
|                   | Zona 2              | 106,51                                           | 117,94                                    | 10,72                    |
|                   | Zona 3              | 103,13                                           | 130,20                                    | 26,25                    |
|                   | Zona 4              | 99,58                                            | 115,51                                    | 16,00                    |
|                   | Zona 5              | 6,43                                             | 9,36                                      | 45,58                    |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>56,38</b>                                     | <b>67,41</b>                              | <b>19,58</b>             |

Neste caso, pode-se notar diferenças significativas nas zonas térmicas localizadas na parte central. A máxima diferença encontrada é na zona central localizada no pavimento tipo, no valor de 778,44%. Isto porque o resultado de carga térmica de resfriamento obtido por meio da simulação é de 1,29 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que pelo metamodelo o valor encontrado é de 11,37 kWh/m<sup>2</sup>. As zonas centrais apresentaram as maiores diferenças porque são compostas de quatro paredes adiabáticas, as quais impedem a transferência de calor para a zona com menor valor de carga interna. Além disso, as zonas térmicas localizadas no pavimento tipo ainda possuem o teto e o piso adiabáticos. Em contrapartida, a menor diferença também pode ser observada no pavimento tipo, na zona 2 (leste), onde o valor de carga térmica é de 178,11 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que o valor encontrado por meio do metamodelo é 2,91% superior. A zona 5 (central) do pavimento térreo também apresenta diferença significativa, no total de 276,26%, e na cobertura a diferença é inferior, no total de 45,58% superior para o resultado obtido por meio do metamodelo. Isto pode ser justificado pelo fato de, no pavimento da cobertura, ocorrer trocas de calor através do teto. Ao analisar a edificação, o valor de carga térmica de resfriamento encontrado é de 56,38 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que para o metamodelo este valor é de 67,41 kWh/m<sup>2</sup>, resultando em uma diferença de 19,58% entre os resultados.

Na **alternativa 15**, a densidade de potência de equipamentos inserida na zona 5 (central) passou de 12 W/m<sup>2</sup> para 60 W/m<sup>2</sup>. As demais zonas térmicas perimetrais continuaram com a densidade de potência de equipamentos de 12 W/m<sup>2</sup>. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-21.

Tabela 4-21: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo para a zona central com alta densidade de carga de equipamentos – Alternativa 15.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença<br/>(%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 81,85                                            | 91,82                                     | 12,18                    |
|                   | Zona 2              | 105,71                                           | 116,22                                    | 9,94                     |
|                   | Zona 3              | 103,67                                           | 127,65                                    | 23,13                    |
|                   | Zona 4              | 98,38                                            | 110,96                                    | 12,79                    |
|                   | Zona 5              | 154,77                                           | 159,54                                    | 3,08                     |
| Tipo              | Zona 1              | 128,17                                           | 143,84                                    | 12,23                    |
|                   | Zona 2              | 178,47                                           | 183,30                                    | 2,70                     |
|                   | Zona 3              | 178,18                                           | 205,98                                    | 15,60                    |
|                   | Zona 4              | 166,48                                           | 176,37                                    | 5,94                     |
|                   | Zona 5              | 211,82                                           | 217,03                                    | 2,46                     |
| Cobertura         | Zona 1              | 80,12                                            | 94,24                                     | 17,62                    |
|                   | Zona 2              | 106,51                                           | 117,94                                    | 10,73                    |
|                   | Zona 3              | 103,12                                           | 130,20                                    | 26,25                    |
|                   | Zona 4              | 99,58                                            | 115,51                                    | 16,00                    |
|                   | Zona 5              | 147,14                                           | 144,21                                    | -2,00                    |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>166,03</b>                                    | <b>174,72</b>                             | <b>5,24</b>              |

Observar-se que a zona térmica que apresenta maior diferença entre os resultados é a zona 3 (norte) localizada no pavimento da cobertura, com valor de 26,25%. O resultado de carga térmica de resfriamento para este caso é de 103,12 kWh/m<sup>2</sup> para a simulação computacional e 130,20 kWh/m<sup>2</sup> encontrada por meio da aplicação do metamodelo. De modo contrário, as zonas térmicas com carga térmica interna superior, representada por aquelas localizadas no centro da edificação (zona 5), apresentaram as menores diferenças entre os modos prever a carga térmica. Assim, na zona 5 do pavimento da cobertura, a diferença foi mínima, no valor de 2,00%. A carga térmica de resfriamento nesta zona térmica encontrada pela simulação computacional foi de 147,14 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto pelo metamodelo foi encontrado o valor de 144,21 kWh/m<sup>2</sup>. Na análise da edificação, nota-se a diferença de 5,24%,

onde o valor da carga térmica de resfriamento obtido pelo *EnergyPlus* é de 166,03 kWh/m<sup>2</sup> e pelo metamodelo é de 174,72 kWh/m<sup>2</sup>.

Na **alternativa 16**, a densidade de potência de equipamentos passou de 12W/m<sup>2</sup> para 26 W/m<sup>2</sup> em todas as zonas térmicas. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 4-22.

Tabela 4-22: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo com o aumento da DPE – Alternativa 16.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 109,21                                | 117,47                                | 7,57                 |
|                   | Zona 2              | 132,83                                | 146,32                                | 10,15                |
|                   | Zona 3              | 130,87                                | 157,34                                | 20,22                |
|                   | Zona 4              | 125,03                                | 140,14                                | 12,08                |
|                   | Zona 5              | 88,44                                 | 84,98                                 | -3,91                |
| Tipo              | Zona 1              | 155,76                                | 169,28                                | 8,68                 |
|                   | Zona 2              | 204,91                                | 212,58                                | 3,74                 |
|                   | Zona 3              | 204,91                                | 233,66                                | 14,04                |
|                   | Zona 4              | 193,76                                | 204,97                                | 5,78                 |
|                   | Zona 5              | 142,16                                | 142,25                                | 0,06                 |
| Cobertura         | Zona 1              | 103,13                                | 115,83                                | 12,32                |
|                   | Zona 2              | 130,71                                | 142,97                                | 9,38                 |
|                   | Zona 3              | 127,97                                | 154,71                                | 20,90                |
|                   | Zona 4              | 123,18                                | 140,02                                | 13,67                |
|                   | Zona 5              | 85,23                                 | 82,89                                 | -2,75                |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>136,86</b>                         | <b>143,03</b>                         | <b>4,51</b>          |

Como pode ser observado, com a alteração nos valores de equipamentos, se obteve variações no consumo de energia. A maior diferença encontrada entre os resultados pode ser observada na zona 3 (norte), sendo este valor de 20,90%. A carga térmica de resfriamento obtida por meio da simulação é de 127,97 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que pelo metamodelo é de 154,71 kWh/m<sup>2</sup>. Observa-se que a carga térmica de resfriamento total da edificação aumentou em relação ao edifício de referência, sendo que o valor encontrado por simulação computacional foi 136,86 kWh/m<sup>2</sup>, e pelo metamodelo 143,03 kWh/m<sup>2</sup>, diferença de 4,51%.

Na **alternativa 17** foram inseridas cargas de potência de equipamentos distintas em cada zona térmica. Nas zonas com fachadas voltadas para o norte e sul (zona 1 e zona 3), a densidade de potência de equipamentos considerada foi de 15 W/m<sup>2</sup>, nas fachadas voltadas para leste e oeste (zona 2 e zona 4) foi de 25 W/m<sup>2</sup> e na zona central (zona 5) foi de 3 W/m<sup>2</sup>. Os resultados encontram-se na Tabela 4-23.

Tabela 4-23: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo com DPE diferente para cada zona térmica – Alternativa 17.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b><i>EnergyPlus</i><br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença<br/>(%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 107,28                                           | 115,60                                    | 7,75                     |
|                   | Zona 2              | 88,52                                            | 97,19                                     | 9,79                     |
|                   | Zona 3              | 128,97                                           | 155,23                                    | 20,36                    |
|                   | Zona 4              | 81,38                                            | 92,60                                     | 13,78                    |
|                   | Zona 5              | 64,68                                            | 62,26                                     | -3,74                    |
| Tipo              | Zona 1              | 153,62                                           | 167,49                                    | 9,03                     |
|                   | Zona 2              | 160,83                                           | 162,79                                    | 1,21                     |
|                   | Zona 3              | 203,19                                           | 231,80                                    | 14,08                    |
|                   | Zona 4              | 149,55                                           | 156,48                                    | 4,64                     |
|                   | Zona 5              | 117,68                                           | 113,65                                    | -3,42                    |
| Cobertura         | Zona 1              | 101,46                                           | 114,21                                    | 12,57                    |
|                   | Zona 2              | 91,62                                            | 103,15                                    | 12,58                    |
|                   | Zona 3              | 126,18                                           | 152,91                                    | 21,19                    |
|                   | Zona 4              | 85,15                                            | 101,03                                    | 18,66                    |
|                   | Zona 5              | 65,24                                            | 65,70                                     | 0,70                     |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>115,71</b>                                    | <b>120,25</b>                             | <b>3,92</b>              |

Conforme pode-se observar, as zonas voltadas para o norte (zona 3), apesar de não apresentar a maior carga de equipamentos, são as que apresentaram maiores resultados de carga térmica de resfriamento. A diferença máxima foi observada na zona 3 da cobertura, no valor de 21,19%, onde o valor de carga térmica de resfriamento obtido por simulação computacional é de 126,18 kWh/m<sup>2</sup>. Ao analisar a edificação, observa-se que o valor de carga térmica total por unidade de área é de 115,71 kWh/m<sup>2</sup>, sendo este valor 3,92% superior ao realizar a predição de carga térmica por meio do metamodelo.

Como pode-se observar, em todas as alternativas em que a densidade de carga interna foi alterada, o metamodelo apresentou valores superiores do que a predição de carga térmica por meio da simulação computacional. Os resultados de carga térmica de resfriamento da zona 3 (norte) do pavimento da cobertura apresentaram diferenças superiores em relação às demais zonas, com exceção da alternativa 14. Nesta alternativa, a zona 5 (central), do pavimento tipo, ofereceu diferenças superiores em relação às demais zonas térmicas. Isto pode ser justificado pelo fato de não haver carga interna na zona 5 (central), além do fato de as seis superfícies desta zona serem adiabáticas, por tratar-se do pavimento intermediário. Na alternativa em que a densidade de pessoas foi superior (alternativa 12) e na alternativa onde as

densidades de carga de equipamentos foram distintas para cada zona térmica, observou-se diferenças inferiores entre os resultados encontrados, portanto, nestas alternativas o metamodelo apresentou os resultados mais precisos.

#### 4.3.6 Variação da massa térmica interna

Na **alternativa 18**, foram acrescentadas salas comerciais de 10 x 10 m na edificação. Representando as divisórias das salas, foram inseridas paredes de 10 cm de espessura e 2,6 m de altura, onde o comprimento linear destas paredes representa a massa térmica interna. Assim, a massa interna correspondente à zona 1 (sul) e zona 3 (norte) são de 18 m; na zona 2 (leste) e zona 4 (oeste) a massa térmica é de 9 m; e na zona 5 (central), no valor de 124,89 m. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 4-24.

Observa-se que na zona 3 (norte) do pavimento da cobertura, a diferença foi a máxima, no valor de 37,81%, onde 107,712 kWh/m<sup>2</sup> foi o valor de carga térmica de resfriamento encontrado por meio do programa de simulação, e 148,44 kWh/m<sup>2</sup> pela aplicação do metamodelo. A menor diferença é observada na zona 5 (central) do pavimento térreo, a qual possui valor superior de massa interna dentre as zonas térmicas. Porém, o valor de carga térmica de resfriamento encontrado nesta zona foi a mínima, no valor de 58,25 kWh/m<sup>2</sup>. Por meio do metamodelo o valor é 1,83% inferior ao encontrado por simulação computacional, portanto na zona com carga térmica inferior foi onde também se observa a mínima diferença entre os resultados. Ao analisar a edificação, encontra-se o valor de 110,25 kWh/m<sup>2</sup> por meio da simulação, e o valor de 124,41 kWh/m<sup>2</sup> por meio do metamodelo, sendo a diferença entre os resultados de 12,85%.

Tabela 4-24: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo ao considerar massa térmica interna – Alternativa 18.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo (kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença (%)</b> |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Térreo            | Zona 1              | 84,62                                 | 105,37                                | 24,52                |
|                   | Zona 2              | 109,23                                | 126,22                                | 15,55                |
|                   | Zona 3              | 108,17                                | 147,58                                | 36,44                |
|                   | Zona 4              | 102,27                                | 120,73                                | 18,04                |
|                   | Zona 5              | 58,25                                 | 57,18                                 | -1,83                |
| Tipo              | Zona 1              | 131,76                                | 162,25                                | 23,14                |
|                   | Zona 2              | 182,44                                | 196,85                                | 7,90                 |
|                   | Zona 3              | 183,62                                | 233,97                                | 27,42                |
|                   | Zona 4              | 171,24                                | 189,79                                | 10,83                |
|                   | Zona 5              | 111,12                                | 116,90                                | 5,21                 |
| Cobertura         | Zona 1              | 82,88                                 | 106,69                                | 28,73                |
|                   | Zona 2              | 110,27                                | 127,03                                | 15,20                |
|                   | Zona 3              | 107,71                                | 148,44                                | 37,81                |
|                   | Zona 4              | 103,60                                | 124,65                                | 20,33                |
|                   | Zona 5              | 60,53                                 | 63,45                                 | 4,82                 |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>110,25</b>                         | <b>124,41</b>                         | <b>12,85</b>         |

Em relação ao edifício de referência, acrescentar o objeto de massa interna significou a obtenção de valores 1,75% superiores para a carga térmica de resfriamento, quando a edificação foi simulada. Porém, com a aplicação do metamodelo, a alteração realizada no valor de massa interna resultou no aumento de 10,08% na carga térmica, em relação ao edifício de referência. Portanto, a diferença observada entre os resultados da alternativa 18 por meio da simulação computacional e do metamodelo justifica-se pelo fato de o metamodelo não apresentar precisão nos resultados com a inserção do objeto de massa interna.

### 4.3.7 Construção das paredes internas

Na **alternativa 19**, as paredes internas de gesso deixaram de ser consideradas adiabáticas. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-25.

Observa-se que a diferença máxima entre os dois resultados se encontra na zona 3 (norte) do pavimento da cobertura, no valor de 33,91%. Nesta zona térmica, os resultados obtidos por meio da simulação e do metamodelo foram 97,23 kWh/m<sup>2</sup> e 130,20 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente. Ao analisar a edificação, a diferença reduziu consideravelmente para 2,51%,

no qual o valor de carga térmica encontrado por meio da simulação foi de 110,26 kWh/m<sup>2</sup> e para o metamodelo foi de 113,02 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabela 4-25: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo com parede internas de gesso e não adiabáticas – Alternativa 19.

| Pavimento         | Zona térmica | EnergyPlus (kWh/m <sup>2</sup> ) | Metamodelo (kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença (%) |
|-------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| Térreo            | Zona 1       | 80,31                            | 91,82                            | 14,34         |
|                   | Zona 2       | 99,57                            | 116,22                           | 16,72         |
|                   | Zona 3       | 98,57                            | 127,65                           | 29,50         |
|                   | Zona 4       | 93,98                            | 110,96                           | 18,07         |
|                   | Zona 5       | 61,53                            | 56,44                            | -8,27         |
| Tipo              | Zona 1       | 133,99                           | 143,84                           | 7,35          |
|                   | Zona 2       | 167,98                           | 183,30                           | 9,12          |
|                   | Zona 3       | 167,55                           | 205,98                           | 22,94         |
|                   | Zona 4       | 158,14                           | 176,37                           | 11,53         |
|                   | Zona 5       | 119,29                           | 105,42                           | -11,63        |
| Cobertura         | Zona 1       | 78,51                            | 94,24                            | 20,04         |
|                   | Zona 2       | 99,42                            | 117,94                           | 18,62         |
|                   | Zona 3       | 97,23                            | 130,20                           | 33,91         |
|                   | Zona 4       | 94,16                            | 115,51                           | 22,67         |
|                   | Zona 5       | 63,77                            | 61,24                            | -3,96         |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>110,26</b>                    | <b>113,02</b>                    | <b>2,51</b>   |

O resultado de carga térmica de resfriamento obtido para o modelo de referência por meio do *EnergyPlus* (108,35 kWh/m<sup>2</sup>), onde as paredes internas foram consideradas adiabáticas, foram inferiores ao resultado obtido pelo mesmo programa quando as paredes foram consideradas não adiabáticas (110,26 kWh/m<sup>2</sup>). Sabendo-se que o resultado obtido por meio da aplicação do metamodelo foi de 113,02 kWh/m<sup>2</sup>, sendo que neste caso está implícito que as paredes são adiabáticas, pode-se concluir o resultado do metamodelo assemelha-se mais com o caso onde o *EnergyPlus* considera as paredes não adiabáticas.

Na **alternativa 20**, as paredes internas foram substituídas de gesso para tijolo cerâmico de 6 furos, com argamassa de 2,5 cm em ambos os lados. Além disso, também foram consideradas não-adiabáticas. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-26.

Tabela 4-26: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo com as paredes internas de tijolo e não adiabáticas – Alternativa 20.

| <b>Pavimento</b>  | <b>Zona térmica</b> | <b>EnergyPlus<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Metamodelo<br/>(kWh/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Diferença<br/>(%)</b> |
|-------------------|---------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Térreo</b>     | Zona 1              | 79,22                                     | 91,82                                     | 15,91                    |
|                   | Zona 2              | 101,03                                    | 116,22                                    | 15,03                    |
|                   | Zona 3              | 98,88                                     | 127,65                                    | 29,10                    |
|                   | Zona 4              | 93,71                                     | 110,96                                    | 18,42                    |
|                   | Zona 5              | 59,38                                     | 56,44                                     | -4,95                    |
| <b>Tipo</b>       | Zona 1              | 133,13                                    | 143,84                                    | 8,05                     |
|                   | Zona 2              | 173,78                                    | 183,30                                    | 5,47                     |
|                   | Zona 3              | 173,10                                    | 205,98                                    | 19,00                    |
|                   | Zona 4              | 162,46                                    | 176,37                                    | 8,57                     |
|                   | Zona 5              | 119,70                                    | 105,42                                    | -11,93                   |
| <b>Cobertura</b>  | Zona 1              | 77,92                                     | 94,24                                     | 20,94                    |
|                   | Zona 2              | 102,37                                    | 117,94                                    | 15,21                    |
|                   | Zona 3              | 98,48                                     | 130,20                                    | 32,21                    |
|                   | Zona 4              | 95,12                                     | 115,51                                    | 21,44                    |
|                   | Zona 5              | 61,80                                     | 61,24                                     | -0,90                    |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |                     | <b>110,82</b>                             | <b>113,02</b>                             | <b>1,99</b>              |

Observa-se que a alteração da parede interna influenciou pouco no resultado, comparando-se com a alternativa anterior. Com as paredes de tijolo, o resultado de carga térmica resultante foi de 110,82 kWh/m<sup>2</sup>, valor um pouco superior quando as paredes eram de gesso. O resultado por meio do metamodelo mantém-se com valor de 113,02 kWh/m<sup>2</sup>, pois não são inseridas informações relativas à parede interna, ou seja, os dados de entrada nestas análises são os mesmos. Portanto, a diferença também foi um pouco superior, no valor de 1,99%. Os resultados observados quanto à modificação das paredes internas demonstram precisão nas considerações adotadas pelo metamodelo.

#### 4.3.8 Número de pavimentos

Na **alternativa 21** a edificação foi considerada com apenas um pavimento. A comparação pode ser observada na Tabela 4-27.

Tabela 4-27: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo na edificação com um pavimento – Alternativa 21

| Pavimento         | Zona térmica | EnergyPlus (kWh/m <sup>2</sup> ) | Metamodelo (kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença (%) |
|-------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| Térreo            | Zona 1       | 74,13                            | 77,43                            | 4,44          |
|                   | Zona 2       | 89,85                            | 96,24                            | 7,11          |
|                   | Zona 3       | 89,53                            | 103,97                           | 16,13         |
|                   | Zona 4       | 86,81                            | 93,50                            | 7,71          |
|                   | Zona 5       | 57,68                            | 51,82                            | -10,16        |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>68,55</b>                     | <b>68,33</b>                     | <b>-0,33</b>  |

Na alternativa 21, foi na zona 3 (norte) onde foi observada a maior diferença entre os resultados obtidos. Porém, ao analisar a edificação térrea observa-se que os valores de carga térmica de resfriamento encontrados por simulação computacional e pela aplicação do metamodelo foram semelhantes, com diferença de 0,33%.

Também foi analisado o caso para uma edificação maior, com 15 pavimentos, característica considerada na **alternativa 22**. Os resultados podem ser observados na Tabela 4-28.

Tabela 4-28: Comparação entre os resultados do *EnergyPlus* e Metamodelo na edificação com quinze pavimentos – Alternativa 22.

| Pavimento         | Zona térmica | EnergyPlus (kWh/m <sup>2</sup> ) | Metamodelo (kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença (%) |
|-------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| Térreo            | Zona 1       | 81,88                            | 91,82                            | 12,15         |
|                   | Zona 2       | 105,82                           | 116,22                           | 9,83          |
|                   | Zona 3       | 103,69                           | 127,65                           | 23,11         |
|                   | Zona 4       | 98,41                            | 110,96                           | 12,75         |
|                   | Zona 5       | 58,19                            | 56,44                            | -3,00         |
| Tipo              | Zona 1       | 125,66                           | 143,84                           | 14,46         |
|                   | Zona 2       | 174,02                           | 183,30                           | 5,33          |
|                   | Zona 3       | 173,95                           | 205,98                           | 18,41         |
|                   | Zona 4       | 162,60                           | 176,37                           | 8,47          |
|                   | Zona 5       | 110,38                           | 105,42                           | -4,50         |
| Cobertura         | Zona 1       | 78,30                            | 94,24                            | 20,35         |
|                   | Zona 2       | 103,14                           | 117,94                           | 14,34         |
|                   | Zona 3       | 65,30                            | 130,20                           | 99,39         |
|                   | Zona 4       | 157,75                           | 115,51                           | -26,78        |
|                   | Zona 5       | 59,54                            | 61,24                            | 2,86          |
| <b>EDIFICAÇÃO</b> |              | <b>121,97</b>                    | <b>127,36</b>                    | <b>4,42</b>   |

Observa-se que na alternativa 22, a maior diferença se encontra no pavimento da cobertura, na zona 3 (norte). A carga térmica de resfriamento encontrada é de 65,30 kWh/m<sup>2</sup>, sendo que este valor é acrescido de 99,39% no resultado encontrado por meio da aplicação do metamodelo. Apesar de a diferença ser grande, quando o edifício com os 15 pavimentos é analisado, percebe-se que os resultados entre os dois resultados se assemelham. O resultado de carga térmica total é 121,97 kWh/m<sup>2</sup> por meio da simulação, e 127,36 kWh/m<sup>2</sup>, por meio da aplicação do metamodelo, diferenciando-se por 4,42%.

Como pode ser analisado no modelo de referência de cinco pavimentos, o resultado encontrado de carga térmica de resfriamento foi de 108,35 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que o metamodelo apresentou uma diferença de 4,31%. Quando se diminui o tamanho da edificação para um pavimento, a carga térmica resultante foi de 68,55 kWh/m<sup>2</sup>, e a diferença entre os resultados foi de 0,33%. Enquanto que, ao aumentar o tamanho da edificação para quinze pavimentos, o valor de carga térmica foi de 121,97 kWh/m<sup>2</sup>, diferenciando-se de 4,42% do metamodelo. Portanto, pode-se concluir que, quando maior a edificação, maior o valor de carga térmica de resfriamento por unidade de área, assim como a diferença entre os resultados encontrados por meio da simulação e por meio da aplicação do metamodelo. Gómez e Lamberts (1995) também já haviam notado que o maior consumo de energia corresponde ao edifício com maior número de pavimentos.

#### **4.3.9 Considerações finais**

Este capítulo apresentou os resultados da aplicação do metamodelo (VERSAGE, 2015).

Foi avaliada a precisão deste método considerando diferentes alternativas a partir da alteração de parâmetros, em relação ao edifício de referência. Obteve-se os resultados de carga térmica de resfriamento por meio da aplicação do metamodelo e pelo programa de simulação *EnergyPlus*. As comparações dos resultados para cada alternativa podem ser observadas na Tabela 4-29.

Tabela 4-29 – Resultados da variação dos parâmetros alterados no trabalho

| Variações         | Carga de resfriamento total EnergyPlus (kWh/m <sup>2</sup> ) | Carga de resfriamento total Metamodelo (kWh/m <sup>2</sup> ) | Diferença (%) |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Referência</b> | <b>108,35</b>                                                | <b>113,02</b>                                                | <b>4,31</b>   |
| Alternativa 1     | 108,53                                                       | 113,76                                                       | 4,82          |
| Alternativa 2     | 104,64                                                       | 107,65                                                       | 2,88          |
| Alternativa 3     | 106,62                                                       | 109,84                                                       | 3,02          |
| Alternativa 4     | 116,86                                                       | 128,44                                                       | 9,91          |
| Alternativa 5     | 112,59                                                       | 121,36                                                       | 7,79          |
| Alternativa 6     | 100,06                                                       | 100,32                                                       | 0,26          |
| Alternativa 7     | 114,74                                                       | 125,49                                                       | 9,36          |
| Alternativa 8     | 99,90                                                        | 90,47                                                        | -9,44         |
| Alternativa 9     | 97,80                                                        | 99,05                                                        | 1,28          |
| Alternativa 10    | 106,55                                                       | 112,84                                                       | 5,90          |
| Alternativa 11    | 96,23                                                        | 91,04                                                        | -5,39         |
| Alternativa 12    | 296,49                                                       | 301,68                                                       | 1,75          |
| Alternativa 13    | 130,17                                                       | 137,14                                                       | 5,36          |
| Alternativa 14    | 56,38                                                        | 67,41                                                        | 19,58         |
| Alternativa 15    | 166,03                                                       | 174,72                                                       | 5,24          |
| Alternativa 16    | 136,86                                                       | 143,03                                                       | 4,51          |
| Alternativa 17    | 115,71                                                       | 120,25                                                       | 3,92          |
| Alternativa 18    | 110,25                                                       | 124,41                                                       | 12,85         |
| Alternativa 19    | 110,26                                                       | 113,02                                                       | 2,51          |
| Alternativa 20    | 110,82                                                       | 113,02                                                       | 1,99          |
| Alternativa 21    | 68,55                                                        | 68,33                                                        | -0,33         |
| Alternativa 22    | 121,97                                                       | 127,36                                                       | 4,42          |

Com base nos resultados é possível ressaltar as seguintes conclusões:

1. As comparações da influência dos parâmetros em cada alternativa, em relação ao edifício de referência, podem ser observadas na Figura 13.

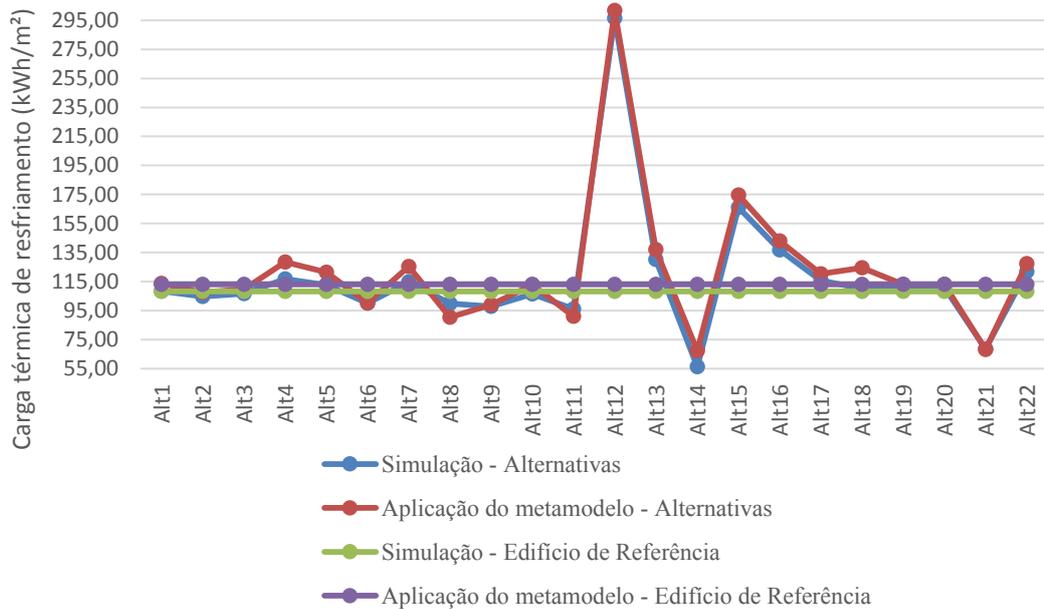


Figura 13- - Influência dos parâmetros na variação da carga térmica

- O aumento da densidade de ocupação de 0,2 pessoas/m<sup>2</sup> para 1,0 pessoa/m<sup>2</sup> (alternativa 12), apresentou o maior crescimento no valor de carga térmica de resfriamento da edificação. No edifício de referência, o resultado de carga térmica obtido por simulação foi de 108,35 kWh/m<sup>2</sup>, e com o aumento da densidade de ocupação este valor passou a ser de 296,49 kWh/m<sup>2</sup>, ou seja, houve um aumento de 173,64% na carga térmica. Por meio da aplicação do metamodelo, os resultados para o mesmo caso foram de 113,02 kWh/m<sup>2</sup> para o edifício de referência e 301,68 kWh/m<sup>2</sup> para a alternativa 12, o qual corresponde a um aumento de 166,92% nos resultados. Além disso, pode-se observar que, por meio da simulação computacional, o aumento do valor de carga térmica de resfriamento foi superior em relação ao edifício de referência.
- Observa-se a redução no valor de carga térmica de resfriamento em relação ao edifício de referência ao considerar aberturas nas fachadas opostas norte e sul (alternativa 11). Nesta alternativa, o valor de carga térmica obtida por simulação reduziu para 99,90 kWh/m<sup>2</sup>, valor 7,80% inferior ao resultado do modelo de referência. Enquanto que, por meio da aplicação do metamodelo, reduziu para 90,47 kWh/m<sup>2</sup>, 19,95% inferior ao resultado do edifício de referência. Portanto, percebe-se que com a aplicação do metamodelo, a orientação das aberturas influencia mais no resultado de carga térmica de resfriamento do que quando a predição de carga

térmica é realizada por simulação. Este foi o caso que apresentou maior diferença entre a sensibilidade dos dois modelos.

4. Na alternativa 22, onde a edificação é considerada com 15 pavimentos, por simulação o valor de carga térmica de resfriamento aumentou 12,57% quando comparado ao edifício de referência, com valor de 121,97 kWh/m<sup>2</sup>. Enquanto que, por meio do metamodelo, o aumento na carga foi de 12,69%, resultando no valor de 127,36 kWh/m<sup>2</sup>. Portanto, a influência percebida ao variar o número de pavimentos foi semelhante em ambos os casos (simulação e metamodelo).
5. Na Figura 14, pode-se observar a relação entre o valor de carga térmica e a diferença entre os resultados.

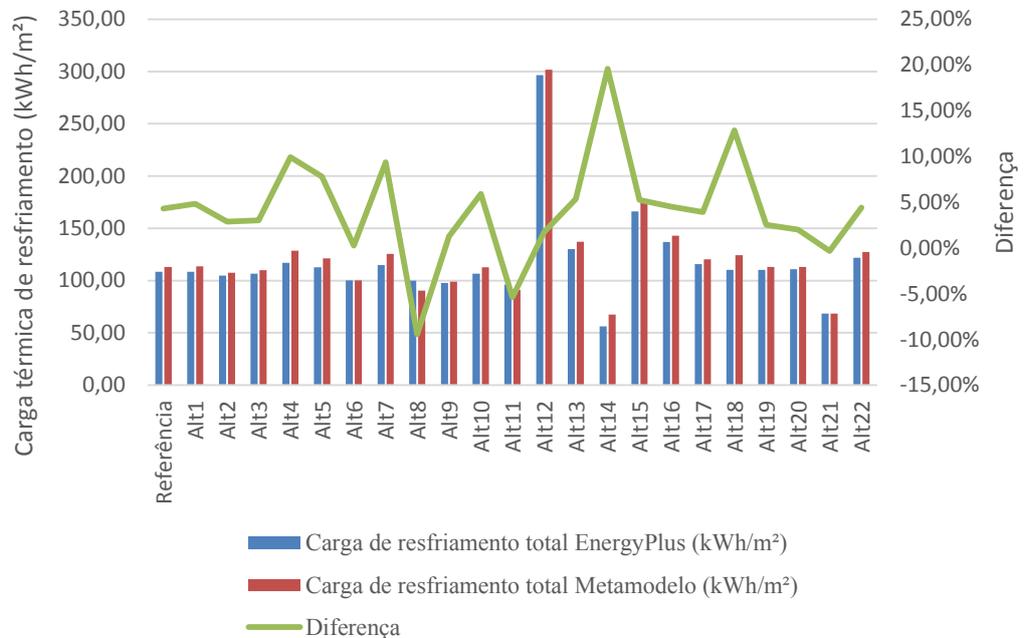


Figura 54 - Relação entre a diferença entre metamodelo e simulação e a carga térmica

6. A aplicação do metamodelo apresentou resultados de carga térmica de resfriamento superiores aos obtidos por simulação computacional, com exceção das alternativas 8 (aberturas nas fachadas norte e sul), 11 (modelagem do vidro de alto desempenho) e 21 (edificação térrea).
7. A maior diferença nos resultados de carga térmica de resfriamento por simulação computacional e por meio do metamodelo foi observada na alternativa 14, onde a zona central foi considerada sem carga térmica interna de iluminação, equipamentos e pessoas; enquanto que as zonas periféricas foram consideradas com carga interna.

Nesta alternativa, o resultado encontrado por simulação foi de 56,38 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que por meio da aplicação do metamodelo o resultado foi de 67,41 kWh/m<sup>2</sup>. O resultado obtido por simulação computacional foi 11,04 kWh/m<sup>2</sup> superior em relação ao resultado obtido por meio do metamodelo, o que corresponde a quase 20%.

8. Na sequência, percebe-se também uma diferença significativa entre os resultados ao considerar o objeto de massa térmica interna, na alternativa 18. O valor obtido por simulação foi de 110,25 kWh/m<sup>2</sup> e por meio da aplicação do metamodelo foi de 124,41 kWh/m<sup>2</sup>, diferenciando-se por 12,85%. Observa-se também que, em relação ao edifício de referência (sem massa interna), a influência em acrescentar este objeto foi significativa apenas nos resultados obtidos por meio do metamodelo. Os resultados do edifício de referência e da alternativa 18 foram semelhantes quando obtidos por meio da simulação computacional sem massa interna ou com massa interna, respectivamente.
9. Observam-se diferenças significativas na alternativa 4, onde a absorvância solar da cobertura é superior em relação ao edifício de referência. Nesta alternativa percebeu-se que a diferença entre os resultados obtidos por meio de simulação computacional e pela metamodelo aumentou para 7,52%.
10. Diferença significativa entre os resultados foram observadas nas alternativas com maior incidência de radiação solar através das áreas de abertura. Isto foi observado na alternativa 8, onde o WWR é de 50% nas fachadas norte e sul; e na alternativa 7, onde o WWR aumentou para 75%.
11. As comparações entre os resultados obtidos por meio da aplicação do metamodelo e da simulação computacional das alternativas analisadas neste trabalho levam a hipótese de que quanto mais exposto o ambiente encontra-se às condições externas, maiores são as diferenças entre os resultados do *EnergyPlus* e do metamodelo
12. Quanto aos demais parâmetros, os resultados encontrados quanto ao valor de carga térmica de resfriamento entre a simulação computacional e o metamodelo foram similares. Conclui-se que, para estas alternativas, a aplicação do metamodelo oferece resultados precisos em relação à simulação computacional.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar as questões qualitativas na aplicação do metamodelo (VERSAGE, 2015). O estudo deu ênfase a edificações comerciais, condicionadas artificialmente, localizadas em Florianópolis. Os objetivos específicos foram atingidos: simular individualmente as zonas térmicas pertencentes a uma edificação a fim de verificar a influência desta consideração; analisar a influência de considerar as superfícies da edificação adiabáticas; e analisar a influência nos resultados de carga térmica de resfriamento em cada zona térmica do metamodelo frente a combinações de diferentes parâmetros. Foi modelado um edifício de referência, utilizado como base para efetuar as simulações computacionais, onde foram alterados dados de entrada a fim de realizar comparações e analisar a carga térmica de resfriamento em cada caso. A ferramenta utilizada para a simulação dos casos foi o programa *EnergyPlus*, programa considerado de ótimo desempenho pelos pesquisadores.

As considerações adotadas no desenvolvimento do metamodelo foram analisadas. Primeiramente, verificou-se a precisão quanto ao fato de o metamodelo combinar todas as variáveis no arquivo de entrada de uma mesma zona térmica. Esta análise foi realizada por meio da simulação computacional do edifício de referência de duas maneiras: simulando o edifício completo e simulando cada zona térmica pertencente ao edifício separadamente. Comparando-se os resultados obtidos, observaram-se resultados satisfatórios, uma vez que a diferença entre os dois tipos de modelagem simuladas foi de 0,07% para o edifício de cinco pavimentos, e 0,02% para edifícios com um pavimento. Portanto, modelar zonas térmicas individualmente, sem considerar a presença de zonas térmicas adjacentes, oferece resultados precisos.

O fato de considerar as paredes internas adiabáticas também foi analisado. Portanto, duas simulações computacionais do edifício foram realizadas: uma com as paredes adiabáticas e outra com as paredes não-adiabáticas. Observou-se que na simulação do edifício de cinco pavimentos com as paredes não-adiabáticas, o resultado de carga térmica foi 1,78% superior ao resultado no qual as paredes foram consideradas adiabáticas. Enquanto que no caso da edificação térrea, a simulação com paredes não-adiabáticas resultou no valor de carga térmica 34,80% inferior ao caso com paredes adiabáticas. Isto explica-se pelo fato de que com as paredes não adiabáticas, ocorre transferência de calor através destas. Assim, o fluxo de calor ocorre entre as zonas térmicas da zona com maior valor de carga térmica em direção à zona com valor de carga térmica inferior. Quando as paredes são adiabáticas, esta compensação de carga térmica entre as zonas térmicas não ocorre, tendo que cada zona suprir a sua própria

necessidade. Portanto, a carga térmica que incide e a carga gerada em cada zona térmica, permanece confinada nesta.

Foi realizada a comparação entre a simulação computacional e a aplicação do metamodelo para o edifício de referência. Para a modelagem, foram inseridas características pertencentes à base de dados utilizada na elaboração do metamodelo. Quanto ao metamodelo, a inserção dos dados de entrada é simplificada em relação à simulação computacional. Dentre os dados de entrada solicitados, encontram-se: orientação da zona térmica, densidade de carga interna, horário de ocupação, infiltração, percentual de abertura da fachada, sombreamento, altura do pé-direito, massa interna, propriedades dos vidros, paredes e cobertura, condições de entorno do piso e do teto. Portanto, observa-se que por meio da simulação, a complexidade da modelagem é superior, com a necessidade de mais dados de entrada. Afim de mensurar a diferença entre o metamodelo e a simulação computacional, foi realizada a comparação quanto ao total de carga térmica de resfriamento do edifício, por unidade de área. Ao realizar a comparação zona por zona, as diferenças entre os resultados são significativas. Esta comparação, de zona por zona, pode ser considerada errada, uma vez que algumas zonas térmicas são mais favorecidas do que outras devido à orientação das fachadas. Portanto, em algumas zonas térmicas ocorre maior incidência de radiação solar, e a carga térmica não se dissipa para as outras zonas térmicas pelo fato de as paredes internas serem adiabáticas. Por isso, observou-se que a diferença entre os resultados do metamodelo e simulação geralmente é máxima na zona 3, correspondente à fachada voltada para o norte, do pavimento da cobertura. Desta forma, é correto ponderar os resultados das zonas térmicas, com o objetivo de obter a carga térmica de todo o edifício por unidade de área. Os resultados obtidos para o edifício de referência apresentaram diferença de 4,31%.

Também foi observado o comportamento dos resultados de carga térmica de resfriamento diante da variação de características. Diferentes complexidades de edificações foram analisadas, entre elas a alteração das características da parede externa. Observou-se que com a redução da capacidade térmica, a diferença entre metamodelo e simulação computacional foi de 4,82%. Ao reduzir a capacidade térmica e a absorvância solar, a diferença foi de 2,88%, e com o aumento da transmitância térmica das paredes externas, a diferença encontrada foi de 3,02%. Portanto, as alterações realizadas quanto à absorvância solar, transmitância ou capacidade térmica não apresentaram influência entre os resultados de carga térmica de resfriamento. Quando se alteram as características da cobertura, notou-se uma diferença significativa pelo fato de alterar para 0,7 a absorvância solar da cobertura (alternativa 4). Nesta

alternativa percebeu-se que a diferença entre os resultados obtidos por meio de simulação computacional e pela metamodelo aumentou para 7,52%.

O percentual de abertura de fachada apresentou relação linear com o valor de carga térmica, assim como o valor da diferença encontrada entre os resultados obtidos. Para o caso com WWR de 25%, a diferença foi de 0,26%, enquanto que para o valor de WWR de 75%, a diferença foi significativa, no valor de 9,36%. Com as aberturas presentes em fachadas opostas, observou-se que a diferença foi grande quando estas foram inseridas nas fachadas norte e sul, com diferença de 9,44%, enquanto que a diferença foi mínima para aberturas no leste e oeste, com valor de 1,28%. Isto porque as fachadas norte e sul possuem a maior área de fachada, e é nesta fachada que ocorre maior incidência de radiação durante o dia. Os resultados obtidos ao simular os vidros por meio do método detalhado foi semelhante ao resultado obtido com a aplicação do metamodelo, onde a condição de entrada dos dados do vidro é realizada com o método simplificado. A diferença encontrada foi em torno de 5,0%, tanto para o vidro simples, como para o vidro de alto desempenho. Na análise da influência dos valores de densidade de carga interna, a alteração da densidade de ocupação foi a alternativa que apresentou a menor diferença dentre as outras alterações, no valor de 1,75%. O aumento da densidade de equipamentos e iluminação apresentou diferença em torno de 5,0%, diferença também observada para a alternativa em que a zona central encontrou-se com alta densidade de equipamentos ou quando cada zona térmica apresentou um valor diferente de densidade de equipamentos. Observou-se diferença de 19,58% na alternativa em que a zona central foi considerada sem carga interna. Esta foi a alternativa que apresentou a diferença mais significativa dentre os resultados obtidos por simulação e por meio do metamodelo. Isto pode ser explicado pelo fato de na zona central todas as seis superfícies serem consideradas adiabáticas, o que impede o fluxo de calor. Em seguida, a maior diferença foi observada na alternativa em que foi inserido o objeto de massa interna, para representar as divisórias das salas comerciais. Neste caso, a diferença foi de 12,85%. As alternativas onde a construção das paredes internas foi modificada e considerada não adiabáticas, a diferença foi mínima, valor em torno de 2,0%. A investigação contemplou ainda a análise da variação do número de pavimentos. Observou-se que quanto maior o número de pavimentos, maior a diferença entre os resultados finais de carga térmica de resfriamento.

Este trabalho analisou a influência em adotar diferentes parâmetros em relação à carga térmica interna de resfriamento. Conclui-se que as maiores diferenças se encontraram nas alternativas com diferença significativa entre a densidade de cargas internas das zonas perimetrais e da zona central, assim como na alternativa onde o objeto de massa interna foi

inserido. As diferenças foram significativas também com a alteração da cobertura e em alternativas com grande área de abertura das fachadas ou quando as aberturas foram orientadas para o norte e sul. Nas demais alternativas, as diferenças entre o metamodelo e a simulação foi semelhante à diferença encontrada no edifício de referência

Concluindo, pode-se afirmar que os resultados expostos para as alternativas estudadas neste trabalho, foram, em grande parte, satisfatórias. Na maioria das alternativas analisadas neste trabalho, as comparações dos resultados encontrados por meio da aplicação do metamodelo foram semelhantes aos resultados simulados.

## 5.1 LIMITAÇÕES

As limitações deste trabalho estão relacionadas aos itens não analisados:

- a) Utilização de outros sistemas de condicionamento de ar diferente do *Ideal Loads*;
- b) Não considerar o uso da ventilação natural;
- c) Não considerar o uso da iluminação natural;
- d) As hipóteses são válidas apenas para uma tipologia analisada.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se alguns estudos para a continuação deste trabalho, descritos abaixo:

- a) Análise do balanço térmico entre as zonas térmicas, a fim de determinar a orientação do fluxo de calor;
- b) Ampliar o número de tipologias, por meio da alteração das dimensões do comprimento, largura e altura do pé-direito;
- c) Aprofundar o estudo de considerar o objeto de massa interna, comparando a inserção deste objeto com a modelagem de paredes;
- d) Simular a utilização de brises projetados adequadamente por fachadas;
- e) Análise de sensibilidade frente a parâmetros não analisados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

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

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 90.1–2004. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2004.

\_\_\_\_\_. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 2005. AUSTRALIAN BUILDING CODES BOARD. **About the Australian Building Codes Board**. 2008. Disponível em: <http://www.abcb.gov.au/about-the-australian-building-codes-board>  
Acesso em: julho de 2015..

\_\_\_\_\_. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1-2013, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Disponível em [https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard\\_90.1-2013\\_I-P](https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_90.1-2013_I-P) Acesso em: 7 de setembro de 2015

\_\_\_\_\_. **Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs**. ASHRAE Standard 140-2004. Atlanta, 2004.

BRASIL – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**, Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em agosto de 2015.

BRASIL. Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001 Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria 163, de 08 de junho de 2009. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001462.pdf>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria 449, de 25 de novembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001627.pdf>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. Lei nº 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, 2001a. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/ministerio/legislacao/decretos/Decreto%20n%204.059-2001.htm>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Brasília, DF, 2001b. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/lei10295.pdf>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

BREGlobal Limited. **BREEAMUK NewConstruction**. Hertfordshire, 2014. Disponível em <http://www.breeam.com/>. Acesso em julho de 2015.

BULLA, A. L.; LAMBERTS, R.. Parametrização do desempenho térmico de edifícios comerciais em Florianópolis. In: Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, III, 1995, Gramado. Anais... Gramado. **ENCAC**. 1995.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Energy efficiency standards for residential and nonresidential buildings**. Sacramento: California Energy Commission, 2001. Disponível em: <http://www.abcb.gov.au/about-the-australian-building-codes-board>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

CARLO, J.; LAMBERTS,R. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. **Energy and Buildings**, v.40, p.2002-2008, 2008

CARLO, J.; LAMBERTS,R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 27-40. 2010

CARRIÈRES, K. R. M.; RORIZ, M. Desempenho térmico e consumo energético de edifícios de escritório em São Carlos, SP. In: Encontro Nacional Tecnologia do Ambiente Construído, **ENTAC**, 2008.

CHVATAL, K., CORVACHO, H. The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption. **Journal of Building Performance Simulation**, v.2, n.4, p 267–282, 2009.

DOE. **United States Department of Energy**. Disponível em: <http://energy.gov/eere/downloads/reference-buildings-building-type-medium-office> Acesso em: março de 2015.

ENERGYPLUS. **United States Department of Energy**. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Acesso em: agosto de 2015.

EU. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Disponível em:< <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>> Acesso em: outubro de 2015.

GHISI, E.; TINKER, J. A.. An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**,v.40, n. 1, p. 51-61, 2005.

GHISI, E.; TINKER, J. A; IBRAHIM, S. H.. Área de janela e dimensões de ambientes para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional. **Ambiente Construído**, v.5, n. 4, p. 81-93, 2005.

GÓMEZ, L. A.; LAMBERTS, R. **Simulação da influência de algumas variáveis arquitetônicas no consumo de energia em edifícios**. Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 1995.

HENSEN, J.L.M.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**, 2011.

INPUT OUTPUT REFERENCE. **United States Department of Energy**. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>> (juntamente com o download do programa). Acesso em: setembro de 2015.

LAM, J. C.; HUI, S. C. M. Sensitivity analysis of energy performance of office buildings. **Building and Environment**, v.31, n. 1, p. 27-39, 1996.

LAM, J. C.; HUI, S. C. M.; CHAN, A. L. S. Regression analysis of high-rise fully air conditioned office buildings. **Energy and Building**, v.26, n. 1, p. 189-197, 1997.

LAMBERTS, Roberto; FOSSATI, Michele. Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C . **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 59-69, 2010.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; ABREU, A.; CARLO, J.; BATISTA, J.; MARINOSKI, D; NARANJO, A. **Desempenho Térmico de Edificações. Apostila de Desempenho Térmico de Edificações**, curso de graduação em Engenharia Civil da UFSC, p. 28-33, Florianópolis, 2011.

LEDER, S. M.; LIMA, E. F. Aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética em Edifícios em um estudo de caso no campus UFPB. **ENTAC**, 2010.

LEED. **Leadership in Energy and Environmental Design**. Disponível em: <<http://www.leed.net/>>. Acesso em: outubro de 2015.

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

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise da influência do desempenho térmico dos fechamentos opacos através do balanço térmico. In: Encontro Nacional Tecnologia do Ambiente Construído, **ENTAC**, 2008.

MELO, A.P.; CÓSTOLA, D.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. Assessing the accuracy of a simplified building energy simulation model using BESTEST: The case study of Brazilian regulation. **Energy and buildings**, 2011a.

MELO, A.P. **Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. Florianópolis, 2012.

MELO, A.P., CÓSTOLA, D.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Development of surrogate models using artificial neural network for building shell energy labelling, **Energy Policy**, v. 69 p. 457–466, 2014a.

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

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional, 2015. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2015\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2015_Web.pdf)> Acesso em: 11 de setembro de 2015.

MORISHITA, C., SORGATO, M. J., VERSAGE, R., TRIANA, M. A., MARINOSKI, D. L., LAMBERTES, R. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e cobertura** (v.5). Florianópolis. 2011.

MOTTA, S. R. F., Análise da influência do vidro das janelas sobre o Consumo energético das edificações. In: **IX Encontro Nacional e V Latino Americano do Conforto no Ambiente Construído**, 2007, Ouro Preto. ENCAC 2007.

Office of the Australian Building Codes International survey of building energy codes. Australian Greenhouse Office, Canberra: Commonwealth of Austrália, p.10, 2000.

Disponível em <http://www.industry.gov.au/Energy/Energy-information/Documents/internationalsurveybuildingenergycodes.pdf>. Acesso em junho de 2015.

PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY. **Relatório técnico. Country Report on Building Energy Codes in Japan**. Asian Pacific Partnership: APP. 2009. Disponível em: <http://www.pnl.gov/>. Acesso em: 7 de setembro de 2015.

Parlamento Europeu e Conselho Europeu. 2010. **DIRECTIVA 2010/31/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO** de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). 2010. Disponível em <http://eur-lex.europa.eu>. Acesso em outubro de 2015.

PBE Edifica. <http://www.pbeedifica.com.br/> Acesso em: 08 de setembro de 2015.

PEDRINI, A.; LIMA, G. L. F.; OLIVEIRA, P. A.; TRINDADE, S. C. Análise comparativa da eficiência energética de envoltórias segundo o Regulamento de Etiquetagem de Edifícios. **ENTAC**, 2010.

PEREIRA, R. P. P.; FONTES, G. P.; RAMOS, G.; LAMBERTS, R. Análise comparativa entre o RTQ-C e a ASHRAE 90.1 para avaliação da eficiência energética de sistemas de iluminação. **ENTAC**, 2010.

PÉREZ-LOMBARD, L., ORTIZ, J., GONZÁLEZ, R., MAESTRE, I. R. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. **Energy and Buildings**, v.41, n.3, p 272-278, 2009.

**RCCTE**. Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (Regulation of the Buildings Thermal Behaviour Characteristics), Ministry of Public Works, Transportation and Communications, Decree-Law nº 80, 2006.

RIBEIRO, Natália F.; CARLO, Joyce C. Estudo do potencial da classificação de níveis de eficiência de projetos luminotécnicos pelo programa brasileiro de etiquetagem. **ENTAC**,2011.

**RSECE**. Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização de Edifícios (Regulation of the Buildings Energetic Systems and Climatization), Ministry of Public Works, Transportation and Communications, Decree-Law nº 79, 2006.

SANTANA, M.V. **Influência dos parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

SANTANA, M.V.; GHISI, E. Influência do percentual de área de janela na fachada e da absorvância de paredes externas no consumo de energia de edifícios de escritório da cidade de Florianópolis – SC. In: **IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, 2007, Ouro Preto. ENCAC. 2007.

SANTOS, I. G. dos; SOUZA, R. V. G. Revisão de regulamentações em eficiência energética: uma atualização das últimas décadas. Revista Fórum Patrimônio – **Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v.1, n.1, p.7-18. 2008.

SANTOS, I. G.; SOUZA, R. V. S. Proteções solares no regulamento brasileiro de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. **Revista Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, 227-241, 2012.

SIGNOR,R., **Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras**. Orientação de Roberto Lamberts. Florianópolis, SC. UFSC. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVA, V. G., SILVA, M. G., AGOPYAN, V. Avaliação de edifícios no Brasil: da avaliação ambiental para avaliação de sustentabilidade. **Revista Ambiente Construído**, v.3, n.3, p.7-18. 2003.

SILVA, P., ALMEIDA, M., BRAGANÇA, L., MESQUITA, V. Methodology to enhance the Portuguese thermal regulation accuracy for existing buildings. In: **Building Simulation**, 2009, Glasgow. Proceedings...Glasgow: IBPSA, 2009. p.2106, 2113.

SORGATO, M.,J., MELO, A.P.,MARINOSKI, D.L., LAMBERTS, R. Análise comparativa entre os resultados de simulação termoenergéticas de edificações sob diferentes condições de entrada das propriedades do vidro. **ENTAC**, 2014.

VERSAGE, R. S. **Metamodelo para a avaliação do desempenho energético de edificações comerciais condicionadas artificialmente**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

YAMAKAWA, M.A., WESTPHAL, F.S. Influência do percentual de abertura nas fachadas e do fator solar dos vidros na etiquetagem do Procel/Inmetro: Método Prescritivo x Simulação. In: **XI ENCAC**. Anais...Búzios, 2011.