

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Gabriel De Grandi**

**DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA  
EDIFICAÇÃO EXISTENTE PELO MÉTODO DE SIMULAÇÃO DO RTQ-C E  
UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL ENERGYPLUS**

Porto Alegre

Dezembro de 2019

**GABRIEL DE GRANDI**

**DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA  
EDIFICAÇÃO EXISTENTE PELO MÉTODO DE SIMULAÇÃO DO RTQ-C E  
UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL ENERGYPLUS**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

**Orientador: Rômulo Plentz Giralte**

**Coorientadora: Cristiane Sardin Padilla de Oliveira**

Porto Alegre - RS

Dezembro de 2019

**GABRIEL DE GRANDI**

**DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA  
EDIFICAÇÃO EXISTENTE PELO MÉTODO DE SIMULAÇÃO DO RTQ-C E  
UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL ENERGYPLUS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador, pela Professora Coorientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

**Prof. Rômulo Plentz Giralt**

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador

**Profa. Cristiane Sardin Padilla de Oliveira**

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Rômulo Plentz Giralt (UFRGS)**

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Cristiane Sardin Padilla de Oliveira (UFRGS)**

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Luciani Somensi Lorenzi (UFRGS)**

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. Renato Fonseca Pedrotti**

Eng. de Energia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha mãe, Valéria,  
que sempre me apoiou e me deu forças para  
seguir em frente. Meu maior exemplo e admiração.  
Dona de uma fé inabalável e um amor imensurável.  
Te amo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à vida, que têm sido generosos a mim.

Aos meus pais, Lino e Valéria, meu porto seguro e minha fonte de inspiração, por terem me apoiado em todas as minhas decisões, me incentivado a buscar o conhecimento e seguir os meus sonhos. Por terem estado sempre comigo, apesar da distância nesses anos de graduação. Por todos os ensinamentos e exemplos de generosidade e humildade, que levarei sempre comigo. Por todo o carinho, amor e apoio psicológico. Amo vocês.

À minha dinda e segunda mãe, Vera Lúcia, minha primeira professora, por acreditar no meu potencial e compartilhar da minha alegria pela vida. Por todos os conselhos, ajuda e amor. Muito obrigado.

Às minhas tias Leda e Mirtes, apoio essencial nesses anos de graduação e responsáveis por tornar mais leve e tranquilo o início da Engenharia. Às minhas tias Clotilde e Sueli, pelos ensinamentos e conselhos recebidos.

À minha irmã, Kalini, pelo apoio, carinho, preocupação e conselhos ao longo desses anos e pela presença mesmo a alguns quilômetros de distância.

Ao meu orientador, professor Rômulo, pelos ensinamentos transmitidos ao longo desses meses de término de graduação, por toda a parceria e a confiança depositadas para a realização deste trabalho, e principalmente, por ter me auxiliado e me orientado da melhor forma possível neste período.

À minha coorientadora, Cristiane, exemplo de professora, por ter me auxiliado em diversos momentos ao longo da graduação, pelos conselhos, pelas contribuições e ensinamentos necessários para a conclusão desse trabalho.

A todos os demais professores, tutores e orientadores que compartilharam parte do seu conhecimento comigo e que tornaram essa conquista possível.

Aos amigos incríveis que tive o prazer de conhecer. Em especial à Fernanda, pela amizade, apoio e confiança, desde o Ensino Médio à finalização deste curso. À Ludmila, pela ajuda, cumplicidade e alto astral que foram imprescindíveis para a conclusão desse período. Aos meus irmãos do coração, Arthur, Ceolin, Gustavo, Mathias, Maurício e Vitor, por toda a parceria, troca de experiências e conhecimentos, viagens e boas risadas. Ao Matheus, por todas as conversas, estudos e trocas de experiência ao longo desse trabalho de conclusão, sem os

quais esse trajeto teria sido mais dificultoso. Obrigado por compartilhar comigo a afinidade pelo desempenho termo energético de edificações e pelo desejo em continuar pesquisando e trabalhando nessa área.

Aos meus amigos do intercâmbio, que compartilharam comigo muitas experiências e momentos ímpares na Ecole des Mines d'Alès e na França e que ocupam um lugar especial na minha vida.

Ao Programa de Educação Tutorial e a tudo que ele me proporcionou ao longo desses anos, principalmente as pessoas que tive a oportunidade de conhecer. Pessoas que me ensinaram a ver a vida de maneira mais bonita e a engenharia de uma forma mais popular e solidária.

Ao CEUE e aos amigos que fiz nesse último ano de graduação, que tornaram os meus dias mais leves e me ensinaram a ter um olhar mais empático.

Enfim, agradeço a todas as demais pessoas que, de alguma forma, fizeram parte da minha trajetória e marcaram a minha vida positivamente.

Obrigado.

Tenho em mim todos os sonhos do mundo.

*Fernando Pessoa*

## RESUMO

O presente trabalho trata da avaliação do comportamento energético de uma edificação de serviço visando a classificação do nível energético através da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. A edificação escolhida para o estudo é um escritório de um pavimento, construído em *steel frame*, na cidade de Porto Alegre – RS. O escritório apresenta um quadro de ocupação das 07h00 às 19h00, durante os dias úteis. A análise da edificação foi feita através do Método de Simulação do RTQ-C do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica em Edificações. Este método compara o consumo de energia elétrica anual em kWh da edificação real com quatro modelos de referência, que representam os níveis energéticos A, B, C e D da etiqueta. A metodologia aplicada consistiu inicialmente no levantamento de informações acerca da edificação, por meio de visitas ao local, análise de projetos existentes e de uma auditoria energética dos sistemas de iluminação, condicionamento de ar e dos equipamentos instalados. A concepção do modelo real e dos quatro modelos de referência foi realizada nos programas computacionais *Sketchup* e *OpenStudio*. As simulações termo energéticas dos modelos foram desenvolvidas no programa de computador *EnergyPlus*, através da inserção de diversos parâmetros de entrada, tais como arquivo climático, tipologia da envoltória, cargas térmicas internas e condicionamento de ar. Por fim, comparou-se o consumo de energia elétrica do modelo real com o consumo dos modelos propostos, obtendo um nível D de eficiência energética. Concluiu-se que a edificação apresenta um comportamento distinto para os períodos de verão e de inverno. O isolamento térmico do envelope reduz a necessidade de aquecimento do ar nos dias frios, mas potencializa a utilização da climatização em dias quentes. Já o sistema de iluminação é ineficiente energeticamente, sendo a segunda maior parcela de gastos de energia elétrica anual do escritório, ficando atrás do consumo de energia com os equipamentos instalados.

Palavras chave: Eficiência energética, Auditoria energética, Simulação Termo Energética, EnergyPlus, RTQ-C, PROCEL.

## ABSTRACT

This work is about the evaluation of the energy efficiency of a service building, with the objective of rating it through the National Energy Conservation Label (ENCE). The building chosen for the study is an office, built in light steel frame, in the city of Porto Alegre - Brazil. The office has an occupancy schedule from 07h00 to 19h00, during working days. The thermo-energetic analysis of the building was made using the RTQ-C Simulation Method of the National Program for Conservation of Electric Energy in Buildings. This method compares the annual electricity consumption in kWh of the actual building with four reference models representing the energy levels A, B, C and D from the label. An applied methodology consists of gathering information about the building, through site visits, analysis of existing projects and an energy audit of lighting systems, air conditioning and equipments. The real model and the four reference models were executed in the Sketchup and OpenStudio softwares. The thermo-energetic simulations of the models were developed in EnergyPlus, by inserting several input parameters, such as climate file, envelope typology, internal loads and air conditioning system. Finally, the electricity consumption of the real model was compared with the consumption of proposed models, obtaining the level D of energy efficiency. It was concluded that this building presents a distinct behavior for the summer and winter periods. The thermal insulation of the envelope reduces the need for air heating on cold days, but enhances the use of air conditioning on hot days. Furthermore, the lighting system is inefficient, being the second portion of annual energy expenditure, after the consumption of electrical equipments.

Keywords: Efficient energy use, energy audit, Thermo-energetic simulation, EnergyPlus, RTQ-C, PROCEL.

## RESUME

Ce travail a pour objectif l'évaluation du comportement énergétique d'un bureau d'études visant sa classification selon le Label National de Conservation d'Énergie (ENCE). Le bâtiment choisi pour cette étude est un bureau en rez-de-chaussée, construit en ossature métallique, dans la ville de Porto Alegre – Brésil. Le bureau dispose d'une table d'occupation de 07h00 à 19h00, pendant les jours ouvrables. L'analyse du bâtiment a été réalisée selon la méthode de simulation du RTQ - Programme National Brésilien pour la Conservation de l'Énergie Électrique dans les Bâtiments. Cette méthode compare la consommation annuelle d'électricité en kWh du bâtiment réel avec quatre modèles de référence représentant les niveaux d'énergie A, B, C et D du label. La méthodologie appliquée consistait, initialement, à recueillir des informations sur le bâtiment, à travers des visites au local, l'analyse de projets existants et d'un audit énergétique des systèmes d'éclairage, de la climatisation et des équipements installés. La conception du modèle réel et des quatre modèles de référence a été réalisée dans les logiciels Sketchup et OpenStudio. Les simulations thermiques dynamiques des modèles ont été développées dans le logiciel EnergyPlus, en insérant plusieurs paramètres d'entrée, tels que le fichier climatique, les caractéristiques de l'enveloppe, les charges thermiques internes et la climatisation. Enfin, la consommation électrique du modèle réel a été comparée à la consommation des modèles proposés, obtenant un niveau D d'efficacité énergétique. Il a été conclu que le bâtiment présente un comportement différent pour chaque saison. L'isolation thermique de l'enveloppe réduit le besoin de chauffage pendant l'hiver, pourtant augmente l'utilisation de la climatisation pendant les mois d'été. Le système d'éclairage n'est pas efficace et occupe la seconde position des consommateurs d'électricité dans le bâtiment, derrière seulement des équipements installés.

Mots clés : Efficacité énergétique, Audit Énergétique, Simulation thermique dynamique, EnergyPlus, RTQ-C, PROCEL.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Fluxograma das etapas do trabalho .....  | 22 |
| Figura 2: Níveis de Eficiência .....   | 26 |
| Figura 3: Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) .....                         | 27 |
| Figura 4: Fluxograma da Metodologia do trabalho .....  | 34 |
| Figura 5: Zoneamento bioclimático brasileiro .....   | 36 |
| Figura 6: Dispositivo de sombreamento composto de cobogós de concreto.....                           | 38 |
| Figura 7: Localização da Edificação .....  | 39 |
| Figura 8: Geometria do escritório – vista sudoeste .....   | 40 |
| Figura 9: Geometria do escritório – vista nordeste.....  | 40 |
| Figura 10: Zoneamento térmico do escritório – <i>Surface Matching</i> .....                          | 41 |
| Figura 11: Zoneamento térmico do escritório .....  | 41 |
| Figura 12: Identificação dos componentes da envoltória – fachada leste .....                         | 43 |
| Figura 13: Identificação dos componentes da envoltória – fachada sul .....                           | 43 |
| Figura 14: Identificação dos componentes da envoltória – fachada norte .....                         | 43 |
| Figura 15: Representação esquemática dos módulos de cobogós .....                                    | 46 |
| Figura 16: <i>Schedule</i> de Iluminação – Sala do Escritório e Sala Comercial .....                 | 48 |
| Figura 17: <i>Schedule</i> de Iluminação – Recepção .....  | 48 |
| Figura 18: <i>Schedule</i> de Iluminação – Sala de Reuniões.....                                     | 48 |
| Figura 19: <i>Schedule</i> de Utilização dos Equipamentos – Sala do Escritório e Sala Comercial..... | 49 |
| Figura 20: <i>Schedule</i> de Utilização dos Equipamentos – Recepção, Sala Rede e Cozinha.....       | 50 |
| Figura 21: <i>Schedule</i> de Utilização dos Equipamentos – Sala de Reunião.....                     | 50 |
| Figura 22: <i>Schedule</i> de Ocupação – Sala do Escritório e Sala Comercial .....                   | 51 |
| Figura 23: <i>Schedule</i> de Ocupação – Sala de Reuniões.....                                       | 51 |
| Figura 24: <i>Schedule</i> de Ocupação - Recepção.....   | 51 |
| Figura 25: MOD-REF-A – fachada leste.....  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 26: MOD-REF-B – fachada leste .....   | 55 |
| Figura 27: MOD-REF-C – fachada leste .....   | 55 |
| Figura 28: MOD-REF-D – fachada leste.....  | 55 |
| Figura 29: Consumo anual de energia elétrica (kWh).....  | 59 |
| Figura 30: Consumo anual de energia elétrica para aquecimento em kWh .....                               | 60 |
| Figura 31: Consumo anual de energia elétrica para resfriamento em kWh.....                               | 60 |
| Figura 32: Divisão do Consumo anual de Climatização em aquecimento, resfriamento e ventilação.....       | 61 |
| Figura 33: Consumo anual de energia elétrica do Sistema de Iluminação em kWh .....                       | 62 |
| Figura 34: Consumo de energia elétrica em MWh por uso final .....  | 63 |
| Figura 35: Consumo mensal de Energia Elétrica em kWh para os sistemas de iluminação e equipamentos ..... | 64 |
| Figura 36: Consumo mensal de energia elétrica em kWh para climatização .....                             | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Ambientes x Área útil (m <sup>2</sup> ).....   | 37 |
| Tabela 2: Zonas térmicas x ambientes.....  | 42 |
| Tabela 3: Identificação dos elementos construtivos .....   | 42 |
| Tabela 4: Elementos construtivos e propriedades termo físicas dos materiais presentes em cada camada ..... | 45 |
| Tabela 5: Absortância para radiação solar.....   | 45 |
| Tabela 6: Sistemas de Iluminação x Potência Total Dissipada por Zona Térmica .....                         | 47 |
| Tabela 7: Equipamentos instalados x Potência Total Dissipada por Zona Térmica .....                        | 49 |
| Tabela 8: Ocupação das Zonas Térmicas .....  | 50 |
| Tabela 9: PAF <sub>T</sub> dos modelos de referência .....   | 53 |
| Tabela 10: Área total por fachada da edificação real .....   | 54 |
| Tabela 11: Área envidraçada de aberturas por nível .....   | 54 |
| Tabela 12: Área envidraçada por fachada para os Modelos de Referência.....                                 | 54 |
| Tabela 13: Densidade de Potência de Iluminação em W/m <sup>2</sup> para os modelos de referência ...       | 58 |
| Tabela 14: Coeficiente de Desempenho (COP) em W/W para os modelos de referência .....                      | 58 |
| Tabela 15: DPI em W/m <sup>2</sup> por zona térmica.....   | 62 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1: Propriedades Térmicas da envoltória x Nível de Eficiência Energética para a Zona Bioclimática 3.....        | 56 |
| Quadro 2: Componentes construtivos da envoltória dos modelos de referência e as suas propriedades termo físicas ..... | 57 |

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BEPOS – Bâtiment à Energie Positive

BLAST – Basic Local Alignmet Search Tool

COP – Coeficiente de Performance

CQ – Coeficiente de fluxo de ar por frestas

DOE – Department of Energy (Estados Unidos)

DPE – Diagnostic de Performance Énergétique

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EnEV – Energieeinsparverordnung (Energy Saving Ordinance - Alemanha)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IWEC – International Weather for Energy Calculations

MOD-REAL – Modelo Real

MOD-REF-A – Modelo de Referência A

MOD-REF-B – Modelo de Referência B

MOD-REF-C – Modelo de Referência C

MOD-REF-D – Modelo de Referência D

NBR – Norma Brasileira Registrada

NCC – National Construction Code (Austrália)

OIA – Organismo de Inspeção Acreditado

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RAC- C – Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

RAC-R – Regulamento de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment

TMY – Typical Meteorological Year

TRY – Test Reference Year

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>20</b> |
| <b>2</b> | <b>DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>   | <b>21</b> |
| 2.1      | OBJETIVO DA PESQUISA .....  | 21        |
| 2.2      | DELIMITAÇÕES .....  | 21        |
| 2.3      | LIMITAÇÕES.....   | 21        |
| 2.4      | DELINEAMENTO .....  | 21        |
| <b>3</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>   | <b>24</b> |
| 3.1      | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....  | 24        |
| 3.1.1    | PROGRAMA NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES –<br>PROCEL EDIFICA ..... | 25        |
| 3.1.1.1  | Processo para Obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)        | 25        |
| 3.2      | CERTIFICAÇÕES ENERGÉTICAS EM OUTROS PAÍSES .....                                    | 27        |
| 3.2.1    | Alemanha.....   | 28        |
| 3.2.2    | Austrália .....   | 28        |
| 3.2.3    | Estados Unidos .....  | 28        |
| 3.2.4    | França .....  | 29        |
| 3.3      | SIMULAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA.....   | 29        |
| 3.3.1    | Programas de Simulação Termo-Energética .....                                       | 30        |
| 3.3.1.1  | <i>Google Sketchup Pro e Openstudio</i> .....                                       | 30        |
| 3.3.1.2  | <i>EnergyPlus</i> .....   | 31        |
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA .....</b>  | <b>33</b> |
| 4.1      | CARACTERIZAÇÃO BIOCLIMÁTICA DA REGIÃO EM ESTUDO.....                                | 34        |
| 4.1.1    | Clima de Porto Alegre.....  | 34        |
| 4.1.2    | Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....   | 35        |
| 4.1.3    | Arquivo Climático.....  | 36        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2      | CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO EM ESTUDO.....  | 37        |
| 4.2.1    | Localização e Orientação Solar.....  | 39        |
| 4.3      | MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO REAL.....  | 39        |
| 4.3.1    | Geometria e Zoneamento Térmico do Escritório .....   | 40        |
| 4.3.2    | Materiais e Elementos Construtivos.....  | 42        |
| 4.3.2.1  | Propriedades Termo Físicas dos Materiais.....  | 43        |
| 4.3.3    | Cargas Térmicas Internas .....   | 46        |
| 4.3.3.1  | Sistemas de Iluminação .....   | 47        |
| 4.3.3.2  | Equipamentos .....   | 48        |
| 4.3.3.3  | Ocupação – Pessoas.....  | 50        |
| 4.3.3.4  | Infiltração de Ar .....  | 52        |
| 4.3.4    | Sistemas de Condicionamento de Ar.....   | 52        |
| 4.4      | MODELAGEM DAS EDIFICAÇÕES DE REFERÊNCIA.....   | 53        |
| 4.4.1    | Geometria.....   | 53        |
| 4.4.1.1  | Definição das Aberturas nos Modelos de Referência .....  | 53        |
| 4.4.2    | Materiais Construtivos e Envoltória.....   | 56        |
| 4.4.3    | Cargas Térmicas Internas .....   | 58        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>   | <b>59</b> |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>65</b> |
| 6.1      | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 65        |
| 6.2      | SUGESTÕES DE PESQUISA.....   | 67        |
| 6.2.1    | Desempenho termo energético de edificações comerciais, de serviço e públicas.....                            | 67        |
| 6.2.2    | Estudo do conforto térmico em edificações comerciais, de serviço e públicas .....                            | 67        |
| 6.2.3    | Revisão da metodologia aplicada pelo RTQ-C e RTQ-R para analisar o desempenho energético de edificações..... | 67        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>68</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>APÊNDICE A – CÁLCULOS DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS .....</b>   | <b>72</b> |
| <b>APÊNDICE B – CÁLCULOS DO INDICADOR DE CONSUMO DA ENVOLTÓRIA E<br/>DA PORCENTAGEM DE ABERTURA DAS FACHADAS .....</b> | <b>80</b> |
| <b>APÊNDICE C – <i>SCHEDULES</i>.....</b>  | <b>87</b> |
| <b>ANEXO A – Planta Baixa do Escritório.....</b>   | <b>90</b> |
| <b>ANEXO B – Cortes A, B e C do Escritório .....</b>   | <b>92</b> |
| <b>ANEXO C – Fachadas do Escritório .....</b>  | <b>95</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A grande maioria das edificações brasileiras não é eficiente energeticamente. A nossa construção civil ainda está pautada em métodos construtivos antigos e sem grandes preocupações com o desempenho energético do produto. O resultado são edificações que necessitam de sistemas secundários como climatização e aquecimento para atingir níveis de conforto aceitáveis. Além disso, a falta de estudos térmicos e luminotécnicos resultam na utilização de materiais com baixa capacidade de isolamento e o superdimensionamento de sistemas de iluminação – onerando os gastos com energia elétrica. Assim, a norma NBR 15220:2005 (ABNT, 2005) e a norma NBR 15575:2013 (ABNT, 2013) surgem com o objetivo de que as edificações apresentem requisitos mínimos de desempenho térmico, lumínico, entre outros, e sejam adaptadas conforme as zonas bioclimáticas onde estão inseridas.

A crescente demanda de energia elétrica impõe a necessidade de ampliação dos sistemas de produção de energia, gerando inúmeros impactos, principalmente no meio ambiente – emissões de gases poluentes, represamento de rios, esgotamento de recursos não renováveis. Em 2018, o consumo comercial e residencial de energia elétrica ultrapassou em 32% o consumo industrial de energia elétrica, de acordo com Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Em meio a esse cenário, algumas medidas vêm surgindo, com a intenção de incentivar o uso racional de energia elétrica no Brasil. O Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL Edifica – é uma delas, objetivando a avaliação e classificação das edificações de acordo com o seu desempenho energético. Para tal, foram desenvolvidos regulamentos que apresentam requisitos técnicos de qualidade para cada nível de eficiência energética de edificações e metodologias diferenciadas para avaliar edificações comerciais e residenciais.

Considerando esse contexto, surgiu a ideia de aplicar a metodologia dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviço e Públicos (RTQ-C), desenvolvida pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, para a caracterização e classificação de uma edificação de serviços na cidade de Porto Alegre, construída com a finalidade de um plantão de vendas e utilizada, atualmente, como um escritório.

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento deste trabalho estão descritas a seguir.

### 2.1 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho é determinar o nível de eficiência energética de uma edificação comercial existente de acordo com o PBE Edifica do Procel, através da metodologia de simulação do RTQ-C, utilizando como programa computacional o *EnergyPlus*.

### 2.2 DELIMITAÇÕES

O trabalho propõe o estudo de caso de uma edificação comercial de aproximadamente 350 m<sup>2</sup>, utilizada como escritório em Porto Alegre - RS. Está delimitado à análise da eficiência energética da edificação.

### 2.3 LIMITAÇÕES

São limitações deste trabalho:

- a) A simulação de um único escritório de serviços, localizado na cidade de Porto Alegre, na Zona Bioclimática 3, sem a comparação com as demais zonas;
- b) A simulação dos modelos com a distribuição solar definida em *FullExterior* no *EnergyPlus*;
- c) O emprego de materiais equivalentes para as composições das envoltórias dos modelos de referência;
- d) A simplificação da parede de cobogós (utilizada como sombreamento para a fachada oeste da edificação) em um “*schedule*” com opacidade de 50%, representando as aberturas dos blocos vazados;

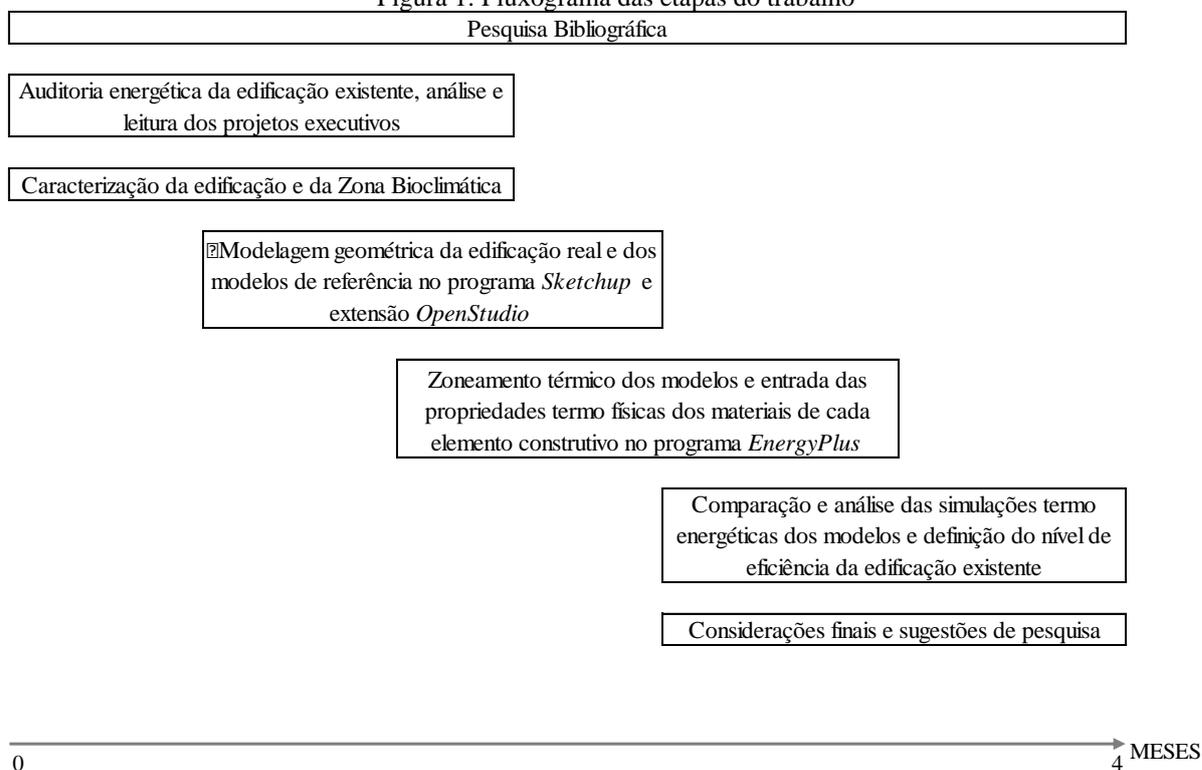
### 2.4 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das seguintes etapas, descritas nos próximos parágrafos e na Figura 1:

- a) Pesquisa bibliográfica;

- b) Auditoria energética da edificação existente, análise e leitura dos projetos executivos;
- c) Caracterização da edificação e da Zona Bioclimática;
- d) Modelagem geométrica da edificação real e dos modelos de referência no programa *Sketchup* e extensão *OpenStudio*;
- e) Zoneamento térmico dos modelos e entrada das propriedades termo físicas dos materiais de cada elemento construtivo no programa *EnergyPlus*;
- f) Comparação e análise das simulações termo energéticas dos modelos e definição do nível de eficiência da edificação existente;
- g) Considerações finais e sugestões de pesquisa.

Figura 1: Fluxograma das etapas do trabalho



(fonte: Autor)

A primeira etapa consiste em uma revisão bibliográfica de assuntos abordados neste trabalho e necessários para elaboração das demais etapas. Foram tratados temas sobre eficiência energética, simulação termo energética e certificação energética. Ao longo do trabalho, foi necessária a revisão de normas e de produções científicas para identificar e qualificar os parâmetros de entrada nos programas computacionais.

Na segunda e terceira etapas, foram realizadas visitas à edificação existente para identificar os elementos e detalhes construtivos. Foi feita uma auditoria dos sistemas de iluminação, de condicionamento de ar e dos equipamentos instalados. Ademais, acompanhou-se a rotina durante o período de funcionamento, para contabilizar o número de pessoas presentes em cada ambiente. Concomitante a isso, os projetos executivos da edificação foram analisados. Também foi identificada a Zona Bioclimática e os dados climáticos de Porto Alegre.

A partir dessas definições, foi realizada a modelagem da edificação e dos modelos de referência nos programas computacionais *Sketchup* e *OpenStudio*, definindo o zoneamento térmico. Paralelamente, foram definidos os materiais e elementos construtivos no programa *EnergyPlus* e referenciados na modelagem.

Após a modelagem geométrica e definição dos elementos construtivos no *OpenStudio*, os demais parâmetros de entrada foram inseridos no *EnergyPlus* para realizar as simulações.

De posse das simulações, comparou-se os resultados dos modelos simulados para, assim, classificar o nível energético da edificação real. Além disso, foi feita uma análise do comportamento da edificação com relação ao seu consumo final.

As considerações finais do trabalho, bem como as sugestões, foram endossadas pela análise dos resultados e no conhecimento adquirido ao longo de todo o trabalho.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo trazer um embasamento dos assuntos iniciais deste trabalho e auxiliar no desenvolvimento da pesquisa. Ele está subdividido em Eficiência Energética, Certificações Energéticas e Simulação Termo Energética.

#### 3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

“A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA na arquitetura pode ser entendida como um atributo inerente à edificação representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia.”(LAMBERTS et al., 2014, p. 5).

Segundo Omer (2008), edifícios consomem uma quantidade relevante de energia e também são grandes emissores de gases de efeito estufa. O consumo de energia elétrica em edificações em 2011, no Brasil, foi de 46,7% (LAMBERTS et al., 2014). Assim, ao melhorar a eficiência energética das edificações, reduziremos os impactos ambientais a elas associados.

A eficiência energética não contribui somente para a diminuição da fatura de consumo das edificações, como beneficia a sociedade pela manutenção dos recursos naturais e do meio ambiente, redução da poluição, menor emissão de gases do efeito estufa, disponibilidade de eletricidade para fins mais nobres do que o desperdício e o consequente desenvolvimento econômico por alocação dos recursos e aumento da competitividade de bens e serviços (SERAFIN, 2010).

Existem diversas abordagens em como tornar edificações mais eficientes. Em seu livro, Heyhood (2017) apresenta estratégias e regras básicas para diminuir o consumo de energia nas edificações através da aplicação de conceitos arquitetônicos e climáticos. A posição da edificação; a sua orientação e forma; a sua envoltória e os sistemas de iluminação, climatização e aquecimento utilizados influenciam diretamente no consumo de energia.

É importante ressaltar que durante a fase de concepção, analisar todas essas condições para o desenvolvimento de um projeto de uma edificação eficiente pode ser menos complexo do que em edificações já construídas. No entanto, edificações existentes também podem passar por requalificações, também chamadas de *retrofit*, através de auditorias de energia.

No Brasil, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) vem desenvolvendo ações ligadas à área de conservação e uso racional de energia em edificações

residenciais, comerciais, de serviços e públicas. Também vem estimulando o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes utilizados em edificações (RODRIGUES et al., 2016). Nessa linha, em 2003, foi criado o PROCEL EDIFICA, com o intuito de racionalizar o uso de energia elétrica.

### **3.1.1 PROGRAMA NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – PROCEL EDIFICA**

O PROCEL EDIFICA foi instituído em 2003 pela ELETROBRAS/PROCEL e em parceria com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro – implementaram o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica). Segundo Lamberts et al., (2014) desde 2009, critérios técnicos foram desenvolvidos para avaliar os edifícios residenciais, comerciais, públicos e de serviço quanto a sua eficiência energética. Assim, foi desenvolvida a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).

#### **3.1.1.1 Processo para Obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)**

A obtenção da ENCE é feita através de uma avaliação dos parâmetros estabelecidos pelo Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e pelo Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) em conformidade às regras contidas nos RAC-C e RAC-R (RODRIGUES et al., 2016). Como o objeto de estudo desta pesquisa é uma edificação comercial, tratar-se-á apenas do RTQ-C e do RAC-C.

De acordo com o Manual para Aplicação do RTQ-C (2016, p. 6),

O regulamento apresenta procedimentos para alcançar níveis mais elevados de eficiência energética nas edificações. A obtenção de uma etiqueta de eficiência não é definitiva e pode ser continuamente melhorada com inovações tecnológicas ao longo dos anos, criando o hábito do aprimoramento constante em eficiência energética, da concepção ao uso da edificação.

O RTQ-C classifica as edificações através da determinação da eficiência da envoltória, da iluminação e do condicionamento de ar. A classificação do nível de eficiência da edificação é realizada através de uma equação geral que engloba os itens supracitados e bonificações. Segundo o Manual para Aplicação do RTQ-C (2016) este nível será condicionado ao atendimento dos pré-requisitos gerais e específicos, sendo possível também a obtenção de

classificações parciais. Contudo, nesse caso, não é fornecida uma classificação geral da edificação, apenas dos sistemas analisados.

Os três sistemas individuais possuem níveis de eficiência que variam do mais eficiente (A) ao menos eficiente (E). A Figura 2 ilustra os níveis de eficiência através das cores do INMETRO.

Figura 2: Níveis de Eficiência



(fonte: Manual para Aplicação do RTQ-C, 2016, p.6)

De acordo com o Manual para Aplicação do RTQ-C (2016) a classificação da envoltória é feita através da determinação de um conjunto de índices referentes às características físicas da edificação. Já a eficiência da iluminação é definida através do cálculo da densidade de potência instalada pela iluminação interna, relacionada com as atividades exercidas pelos usuários em cada ambiente específico. Para a classificação da eficiência dos sistemas de condicionamento de ar, deve ser analisada qual a classe utilizada na edificação, relacionada a sistemas individuais ou centrais de condicionamento. A classe relacionada aos sistemas individuais e *split*, é classificada através da etiqueta fornecida pelo próprio INMETRO. Já a segunda, que trata a eficiência de sistemas como de centrais de condicionamento, não classificados pelo INMETRO, deve seguir prescrições definidas no texto do regulamento, sendo mais complexa.

Depois de finalizado o cálculo dos três sistemas, os resultados parciais são inseridos na equação geral para verificar o nível de eficiência global da edificação. O formato da ENCE, com os níveis finais e parciais da edificação, estão apresentados na Figura 3.

Figura 3: Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)



(fonte: Manual para Aplicação do RTQ-C, 2016, p.8)

### 3.2 CERTIFICAÇÕES ENERGÉTICAS EM OUTROS PAÍSES

A crise do petróleo da década de 70 serviu como alerta para que muitos países pesquisassem novas fontes de energia. Devido aos altos custos das fontes disponíveis e longos períodos para implantação de novos parques geradores, o uso racional de energia passou a ser encarado como a opção mais vantajosa. Desde então, diversos países lançaram programas de incentivo à redução do consumo de energia, tais como a *Standard 90, Energy Conservation in New Building Design* e a norma californiana *Title 24* de 1978 (GOULART; LAMBERTS, 2005).

A seguir serão apresentadas as certificações energéticas da Austrália, Alemanha, Estados Unidos e França, demonstrando algumas diferenças nas metodologias e etiquetagem.

### 3.2.1 Alemanha

Na Alemanha, em 1977 foi lançada a primeira portaria, com referência o isolamento térmico de edificações (*Thermal Insulation Ordinance*). A partir de 2007, as portarias passaram a serem chamadas de Energy Saving Ordinance (EnEV) e tratam do desempenho energético como um todo. Para uma edificação alemã ser certificada, é necessário compará-la a um modelo virtual de referência, que apresenta características compatíveis às suas, apresentado exigências individuais de desempenho energético para cada edificação. No entanto, a EnEV apresenta valores mínimos de eficiência energética (BAVARESCO; GHISI, 2016).

As etiquetas de desempenho energético alemãs não apresentam níveis de eficiência para classificar as edificações, mas sim um índice que relaciona o consumo (kWh/m<sup>2</sup>.ano) a uma cor. Este vai de verde (0 kWh/m<sup>2</sup>.ano) a vermelho ( $\geq 400$  kWh/m<sup>2</sup>.ano), ou seja, do mais eficiente ao mais ineficiente (AMECKE, 2012).

### 3.2.2 Austrália

Na Austrália, os requisitos de eficiência energética em edificações estão inseridos no *National Construction Code* (NCC). Há duas categorias para as edificações: residenciais unifamiliares e multifamiliares ou comerciais e públicas. A classificação da eficiência energética da edificação é representada através de estrelas. Quão maior o número de estrelas, mais eficiente é a edificação.

Assim como na Alemanha, a avaliação do consumo energético é realizada através da comparação do modelo existente a um modelo virtual com as mesmas características de envoltória e padrões de uso. As normas apresentam requisitos mínimos que, quando cumpridos, garantem um total de seis estrelas à edificação. Entretanto, este número aumenta conforme soluções mais eficientes sejam apresentadas.

No código australiano, o NCC, é considerado o consumo energético de energia final para aquecimento e resfriamento de ambientes.

### 3.2.3 Estados Unidos

Nos Estados Unidos a etiquetagem de edificações é uma iniciativa de setores governamentais e não governamentais. Uma das iniciativas não governamentais bastante conhecida é a etiquetagem da ASHRAE (*American Society of Heating Refrigerating and Air-*

*Conditioning Engineers*), que consiste na avaliação da eficiência energética de edificações, conhecida como *Building Energy Quotient* (bEQ). Esta certificação é válida para edificações comerciais novas e existentes. As novas recebem apenas a classificação “*as designed*”, enquanto as existentes também podem ser certificadas com a avaliação “*in operation*”, havendo a necessidade de possuir os dados de consumo energético de, pelo menos, um ano para o edifício ser avaliado (BAVARESCO; GHISI, 2016).

Ambas as certificações geram uma escala de eficiência que varia de A a G. O nível mais eficiente é subdividido em A+, A e A-. A inserção da edificação nos níveis de eficiência depende de seu consumo de energia primária por área.

### 3.2.4 França

Na França, a etiquetagem de eficiência energética em edificações é de responsabilidade do Ministério da Habitação. O primeiro regulamento francês foi lançado em 1974, sendo atualizado diversas vezes e sempre aplicado às novas edificações. A última delas, a *Réglementation Thermique 2012* (RT2012), que foi implementada em 2013, apresenta grandes exigências para o consumo de energia primária. O regulamento estipula máximo consumo de energia primária em 50 kWh/m<sup>2</sup>.ano para edificações residenciais, 70 kWh/m<sup>2</sup>.ano para edificações não residenciais sem sistema de condicionamento de ar e 110 kWh/m<sup>2</sup>.ano para as que possuem sistema de condicionamento de ar (BAVARESCO; GHISI, 2016). Ela leva em considerações a envoltória da edificação, a estanqueidade à infiltração do ar e os sistemas de aquecimento, aquecimento de água, ventilação, resfriamento, iluminação e as bombas.

Em 2020, a França terá a nova regulamentação, a RT 2020. Um dos principais objetivos dessa atualização é a implantação do conceito de edificação de energia positiva (*Bâtiment à Energie Positive - BEPOS*) e será aplicada às novas construções.

As certificações francesas são chamadas de *Diagnostic de Performance Énergétique* (DPE). Elas apresentam duas variáveis principais, o consumo de energia primária e as emissões de CO<sub>2</sub>, classificando as edificações em uma escala que varia de A a G.

## 3.3 SIMULAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA

A utilização de programas de simulação, possibilita a avaliação do desempenho térmico e energético de edificações, e pode considerar inúmeras alternativas de projeto, como diferentes opções de desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou de

condicionamento de ar. Além disso, é possível estimar o consumo de energia, o seu custo e ainda o impacto ambiental provocado por determinada alternativa antes mesmo da execução do projeto (MENDES et al., 2005).

Segundo Didoné e Pereira<sup>1</sup> (2010, p.139) "a avaliação do desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares" (apud OLIVEIRA et al., 2016, p. 226).

É importante salientar que geralmente são utilizados arquivos de dados climáticos das 8760 horas do ano para representar as condições externas à edificação, como, por exemplo, a temperatura do ar, a umidade relativa, a radiação solar e os ventos (MENDES et al., 2005).

### 3.3.1 Programas de Simulação Termo-Energética

Segundo Mendes et al. (2005) a utilização de programas computacionais de simulação, no Brasil, está presente desde a década de 80. Ao longo desses anos, as pesquisas brasileiras foram desenvolvidas utilizando diversos programas de simulação, tais como *DOE-2*, *BLAST*, *ESP-r*, *RADIANCE*, *TRNSYS*, *FLUENT* e *ENERGYPLUS*. Ademais, as ferramentas de simulação computacionais podem servir de suporte na aplicação de normas de desempenho e de eficiência energética e no projeto de edificações de alta eficiência.

A análise termo energética do estudo de caso desta pesquisa será feita a partir da utilização do programa *EnergyPlus* e a modelagem tridimensional a partir do programa *SketchUp* e do plug-in *OpenStudio*. Neste capítulo trataremos sobre cada um deles.

#### 3.3.1.1 Google Sketchup Pro e Openstudio

O *Google SketchUp Pro* é um programa de modelagem tridimensional utilizado mundialmente, por arquitetos, engenheiros e acadêmicos. É intuitivo, de fácil manuseio e neste caso, será utilizado para criar a geometria do modelo 3D que será importado para o *EnergyPlus*.

Já o *OpenStudio* é uma extensão que adiciona funções ao Sketchup. Através dele é possível criar e editar a geometria da edificação com os comandos padrão de desenho do SketchUp e salvar como EnergyPlus Input File (idf) – programa de simulação.

---

<sup>1</sup> DIDONÉ, Evelise Leite; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 139-154, out./dez. 2010. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/12108>>

A integração entre *SketchUp* e o *OpenStudio* permitirá a modelagem da geometria da edificação, definindo as zonas térmicas e os elementos de sombreamento. (WEBER, 2017). O balanço térmico das zonas criadas será feito pelo *EnergyPlus* e os elementos de sombreamento serão interpretados como dispositivos que impactam nestas zonas.

### 3.3.1.2 *EnergyPlus*

O programa *EnergyPlus* tem as suas raízes em dois outros programas: BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE (*Department of Energy*). Segundo Strand et al.<sup>2</sup> (1999) esses programas computacionais foram desenvolvidos no final da década de 70 como ferramentas de simulação de carga térmica e de análise do consumo de energia elétrica. Tanto o BLAST quanto o DOE surgiram em um ambiente imerso em preocupações alavancadas pela crise mundial de energia, no começo da década de 70, e mais tarde junto ao reconhecimento de que o consumo de energia elétrica em edificações era a principal fonte do consumo total de energia elétrica do país (apud CAROTENUTO, 2009, p. 27).

De acordo com Melo et al., (2009, p.3) “o programa possui capacidade de simulação diferenciada, tais como ‘*time-step*’ de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas”.

Como seus progenitores, o *EnergyPlus* é um programa de simulação de carga térmica e de análise do consumo de energia elétrica. Baseado na descrição de um prédio feita pelo usuário a partir da perspectiva da constituição física da edificação e sistemas mecânicos associados, o *EnergyPlus* calcula as cargas térmicas de refrigeração e de aquecimento necessárias para manter um adequado controle térmico, condições por todo o sistema secundário de HVAC e cargas da serpentina, e o consumo de energia elétrica dos equipamentos da planta primária, como também vários outros detalhes que são necessários com o objetivo de verificar se a simulação está executando como deveria ser para um prédio real (EnergyPlus, 2019c).

Segundo Carotenuto (2009), as principais características do programa *EnergyPlus* são:

- solução simultânea e integrada, onde a resposta da edificação e os sistemas primário e secundário estão rigorosamente acoplados;

---

<sup>2</sup> Strand, R. et al., 1999. “Enhancing and Extending the Capabilities of the Building Heat Balance Simulation Technique in EnergyPlus”, In Proceedings of Building Simulation’99 – IBPSA International Conference, September 1999, Kyoto, Japan.

- intervalos de tempo definíveis pelos usuários, para interação entre as zonas térmicas e o ambiente e, intervalos de tempo variáveis para interação entre as zonas térmicas e os sistemas de HVAC (automaticamente e internamente variados para garantir a estabilidade numérica da solução);
- arquivo climático e arquivos de entrada e saída baseados no formato ASCII, que inclui condições ambientais horárias ou sub-horárias e relatórios definíveis pelo usuário;
- técnica de solução baseada no balanço de energia para cargas térmicas de edificações, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos da radiação e da convecção nas superfícies interna e externa em cada intervalo de tempo;
- condução de calor transiente através dos elementos da edificação, tais como paredes, tetos, piso etc., usando as funções de transferência por condução;
- modelagem avançada da transferência de calor pelo solo, através de modelos de diferenças finitas computacionais e técnicas analíticas simplificadas;
- modelo combinado de transferência de calor e massa que considera a adsorção e a dessorção de umidade, como uma integração camada a camada com as funções de transferência por condução ou o Modelo da Profundidade Efetiva de Penetração de Umidade (EMPD: Effective Moisture Penetration Model);
- modelos de conforto térmico (Fanger, Pierce, KSU) baseados na atividade física, na temperatura de bulbo seco interna, na umidade etc.;
- cálculos avançados para as superfícies transparentes ou translúcidas, como vidros das janelas, incluindo controle de cortinas, balanços de energia por camada dos vidros das janelas, e uma biblioteca de desempenho de muitos vidros comercialmente disponíveis;
- controle da luz do dia, incluindo cálculos de iluminação interior, simulação e controle do brilho, das luminárias e do efeito da redução da luz artificial no aquecimento e na refrigeração;
- sistemas de HVAC configuráveis, que permitem aos usuários modelar sistemas típicos e muito pouco modificados sem recompilar o código fonte do programa;
- cálculo da poluição atmosférica, que predizem os níveis de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e CO;
- comunicação com outros ambientes de simulação, tal como WINDOW5.

## 4 METODOLOGIA

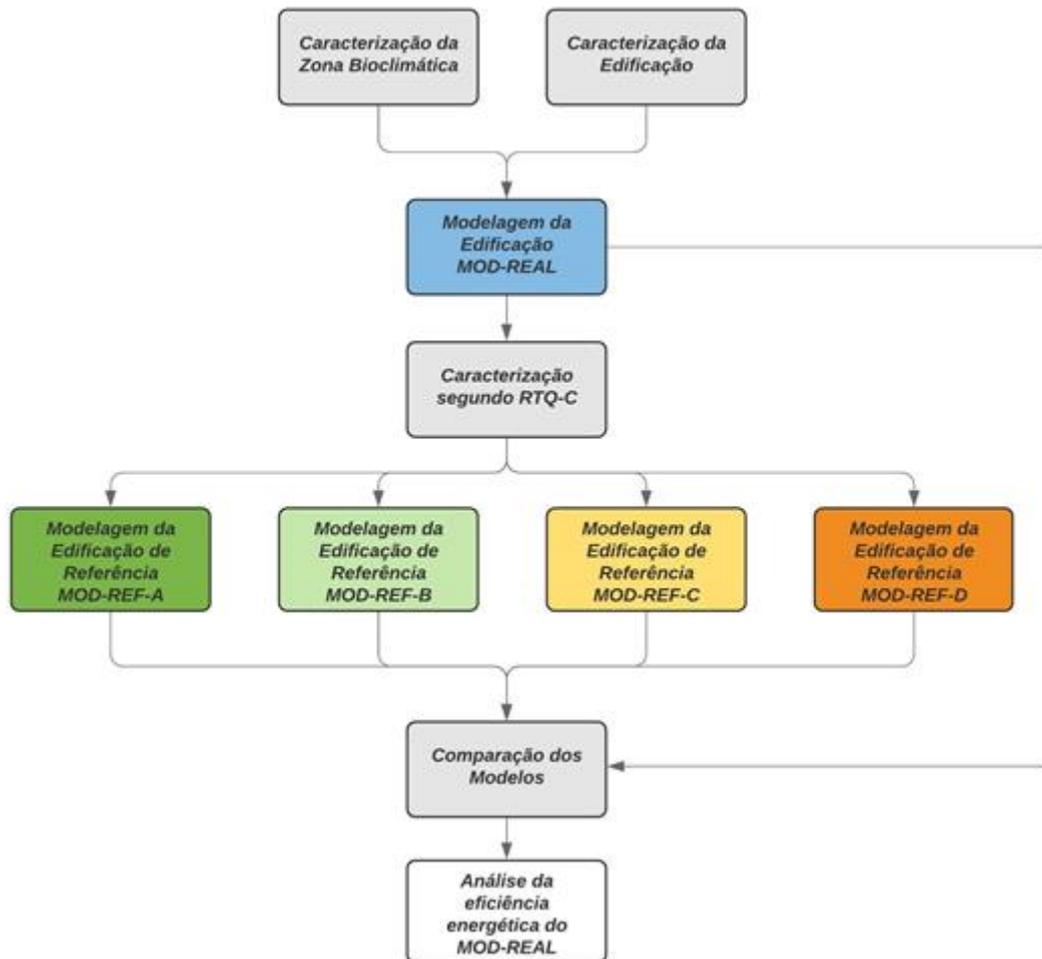
A metodologia empregada neste trabalho foi dividida em diversas etapas. Primeiramente, foi feita a descrição da zona bioclimática. Depois, para caracterizar a edificação alvo do estudo, foram feitas visitas ao local, uma auditoria energética dos equipamentos e dos sistemas de iluminação, um levantamento fotográfico e uma análise dos projetos executivos existentes. Após a caracterização, foi realizada a modelagem do edifício para a criação do modelo que representa a situação real, sendo utilizada, a partir de agora, a nomenclatura MOD-REAL.

Em um segundo momento, para avaliar a eficiência energética da edificação, foram utilizados os métodos propostos pelo RTQ-C, sendo necessária a comparação do MOD-REAL com outros quatro modelos. Esses modelos são chamados de modelos de referência e representam os níveis de eficiência A, B, C e D, sendo o A o que apresenta o melhor desempenho energético deles. Segundo o RTQ-C, não é necessário modelar o pior dos níveis (E) pois entende-se que quaisquer resultados abaixo do esperado pelo modelo D (através da simulação) enquadram-se na pior situação energética. Assim, a partir de agora, será utilizada a nomenclatura MOD-REF-A, MOD-REF-B, MOD-REF-C e MOD-REF-D para relacionar os quatro modelos de referência estabelecidos. A modelagem e o detalhamento dos cinco modelos serão tratados neste capítulo.

Por fim, foi feita uma comparação do consumo anual de energia elétrica (em kWh) do MOD-REAL com os Modelos de Referência de acordo com o RTQ-C.

A Figura 4 apresenta o fluxograma da metodologia empregada neste trabalho. As etapas descritas serão abordadas nos próximos itens.

Figura 4: Fluxograma da Metodologia do trabalho



(fonte: Autor)

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO BIOCLIMÁTICA DA REGIÃO EM ESTUDO

A caracterização bioclimática é um fator determinante para avaliação do desempenho termo energético de edificações. Segundo Siqueira et al. (2005) o clima afeta a execução, a segurança, o conforto e o desempenho energético das edificações. Para tal, é imprescindível a análise e a caracterização do clima do local onde a edificação encontra-se instalada.

##### 4.1.1 Clima de Porto Alegre

Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul, está situada à beira do lago Guaíba e conseqüentemente recebendo influência direta do grande volume de água circundante. Essa condição faz com que o teor de umidade no ar seja significativo. O clima da cidade é afetado basicamente por dois fatores: a amplitude térmica diária e a condição da umidade

associada às temperaturas elevadas (SILVA; KINSEL, 2006). Assim, caracteriza-se por altas temperaturas na primavera e no verão, enquanto no outono e no inverno massas de ar polar marítima contribuem para que haja quedas bruscas de temperatura.

A precipitação média anual é distribuída uniformemente ao longo do ano, não apresentando assim uma estação seca (KINSEL, 2009). Os ventos são predominantes na maior parte do ano e segundo Ferraro e Hasenack<sup>3</sup> (2000), a velocidade, em termos médios, é baixa. Contudo, eventualmente podem ocorrer rajadas de vento, atingindo valores muito superiores aos padrões médios. Ademais, o traçado das ruas, a geometria dos prédios, o relevo e até a vegetação no entorno podem influenciar a direção e a velocidade dos ventos (*apud* MORELLO, 2005).

#### **4.1.2 Zoneamento Bioclimático Brasileiro**

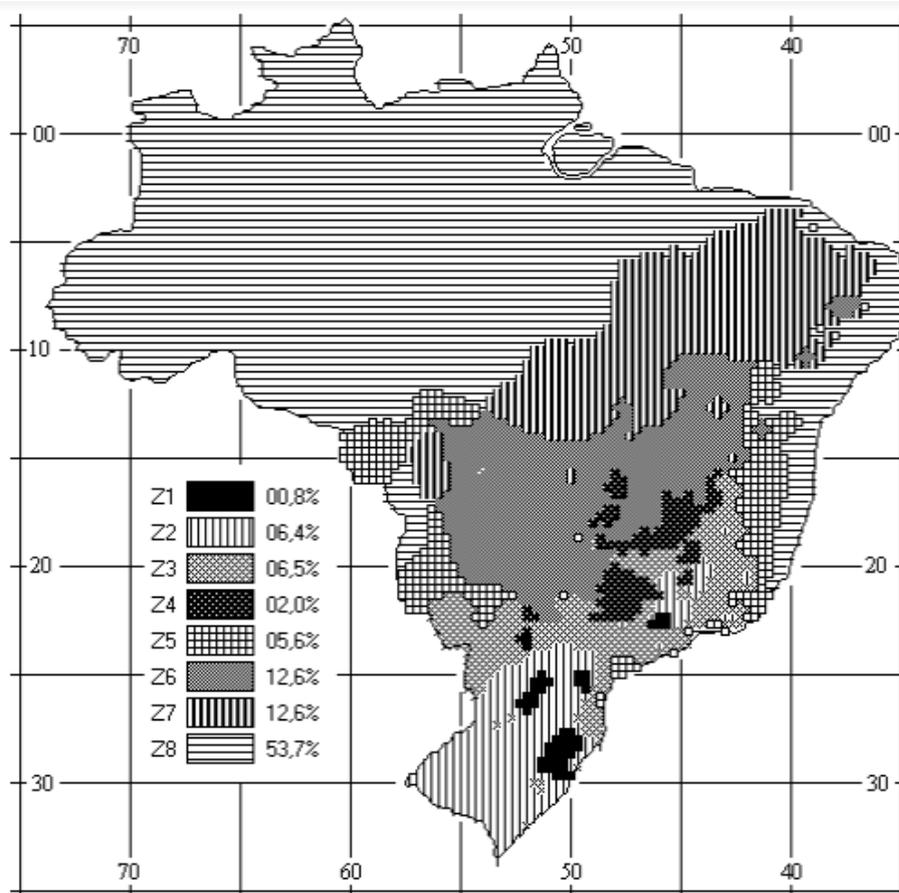
Segundo Siqueira et al. (2005) o clima tropical predomina no Brasil. A influência de diversos fatores como a continentalidade, a maritimidade, a latitude, o relevo e as massas de ar fazem com que existam vários subtipos de clima tropical (altitude, continental e semi-árido), o equatorial e o subtropical. Essa diversidade climática potencializa a ideia de que as edificações brasileiras possuem exigências térmicas distintas para cada região brasileira. Assim, a NBR 15.220-3 (ABNT, 2005C) propõe o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, trazendo oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima (Figura 5). Além disso, ela apresenta um conjunto de recomendações técnico-construtivas que otimizam o desempenho térmico das edificações.

A zona bioclimática 3 representa a cidade de Porto Alegre. De acordo com a NBR 15220-3, para a zona bioclimática 3, recomenda-se o uso de aberturas para ventilação de dimensões médias, com sombreamento no verão e passagem livre dos raios solares no inverno. Propõe também paredes e coberturas de inércia térmica leve, sendo as paredes refletoras e as coberturas isoladas termicamente.

---

<sup>3</sup> FERRARO, L.W.; HASENACK, H. Aspectos do Clima de Porto Alegre. In: ZURITA, M.L.L.; TOLFO, A.M. (Org.) A Qualidade do Ar em Porto Alegre. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000. p.16-27.

Figura 5: Zoneamento bioclimático brasileiro



(fonte: NBR 15.220-3:2005)

### 4.1.3 Arquivo Climático

Segundo Lamberts et al. (2015), o conhecimento das condições climáticas externas é de extrema importância, pois representa os requisitos básicos para o projeto de sistemas de condicionamento de ar, cálculos simplificados do consumo de energia e para as simulações termo energéticas de edificações. A utilização de arquivos climáticos permite identificar os períodos de maior probabilidade de conforto ao usuário, e consequentemente, definir as estratégias que devem ser incluídas na edificação para melhorar as condições de conforto.

Existem diversos tipos de arquivos climáticos que podem ser utilizados em programas de simulação computacional. Contudo, muitos deles apresentam dados somente para um determinado país. No Brasil, dentre os diferentes tipos de arquivos climáticos existentes para o uso em simulação computacional destacam-se: *Test Reference Year (TRY)*, *Typical Meteorological Year (TMY)*, *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*,

*International Weather for Energy Calculations (IWEC)*; INMET (dados medidos nas estações automáticas do INMET, com extensão .epw) (LAMBERTS et al., 2015).

Para este trabalho, utilizou-se o arquivo climático no formato INMET da cidade de Porto Alegre do ano de 2016, disponível no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Os arquivos climáticos do Instituto Nacional de Metrologia apresentam as seguintes variáveis: temperatura do ar, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, pluviosidade e irradiância global sobre o plano horizontal (LAMBERTS et al., 2015).

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO EM ESTUDO

A edificação estudada está localizada na cidade de Porto Alegre – RS. Trata-se de um escritório em pavimento térreo, com uma área de projeção da cobertura ( $A_{pcob}$ ) de 355,87 m<sup>2</sup> e composto de treze ambientes: uma recepção, quatro salas funcionais do escritório, uma cozinha/copa, cinco banheiros, um depósito e uma circulação. A Tabela 1 relaciona o ambiente com a respectiva área útil.

Tabela 1: Ambientes x Área útil (m<sup>2</sup>)

|    | <b>Ambiente</b>          | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> |
|----|--------------------------|-----------------------------|
| 1  | Sala do Escritório       | 136,69                      |
| 2  | Recepção                 | 137,74                      |
| 3  | Sala Comercial           | 18,05                       |
| 4  | Sala Rede                | 11,91                       |
| 5  | Sala de Reuniões         | 15,19                       |
| 6  | WC Feminino              | 2,79                        |
| 7  | WC Masculino             | 2,79                        |
| 8  | Cozinha                  | 13,04                       |
| 9  | WC Masculino - Vestiário | 3,51                        |
| 10 | WC PNE                   | 3,57                        |
| 11 | Depósito                 | 3,57                        |
| 12 | WC Feminino - Vestiário  | 3,24                        |
| 13 | Circulação               | 3,78                        |

(fonte: elaborada pelo autor)

Os anexos A, B e C apresentam respectivamente a planta baixa, os cortes e as fachadas da edificação.

A estrutura da edificação é composta pelo sistema *light steel frame*. As paredes externas são fechadas por uma placa de gesso de 1,25cm na parte interna e por uma placa de gesso texturizada de 1,25cm na parte externa, fixadas em montantes metálicos e separadas por uma

camada de ar, totalizando 14cm. As paredes internas possuem a mesma composição, com exceção da camada texturizada, totalizando 12cm. Nas paredes da sala de reuniões, foi adicionado à camada de ar um isolante acústico – lã de rocha – para minimizar o ruído. Todos os vidros da edificação são laminados e possuem uma espessura de 10mm.

A principal fachada possui orientação oeste, sendo revestida em vidro, em quase a sua totalidade, formando amplas janelas. O pé direito da edificação tem 2,90m, com exceção de um trecho que possui 4,96 m de altura (Anexo C – Corte C). Ainda na fachada oeste, uma parede de cobogós é utilizada como dispositivo de sombreamento para um trecho envidraçado da Recepção (Figura 6). A fachada sul não apresenta nenhuma esquadria, enquanto a norte possui duas portas envidraçadas e a leste uma porta envidraçada, uma janela fixa e quatro janelas basculantes envidraçadas.

Figura 6: Dispositivo de sombreamento composto de cobogós de concreto



(fonte: Autor)

A cobertura da edificação é constituída de uma telha termoacústica sanduíche– composta por duas chapas de aço galvanizado de 5 mm e uma camada intermediária de poliestireno de 3 cm – sustentada por uma estrutura metálica. O forro é em gesso e possui uma espessura de 1 cm. O piso do escritório é elevado em 55 cm do solo, tendo como base uma laje mista de concreto armado composta por um sistema estrutural de vigotas tabelas e capa de concreto.

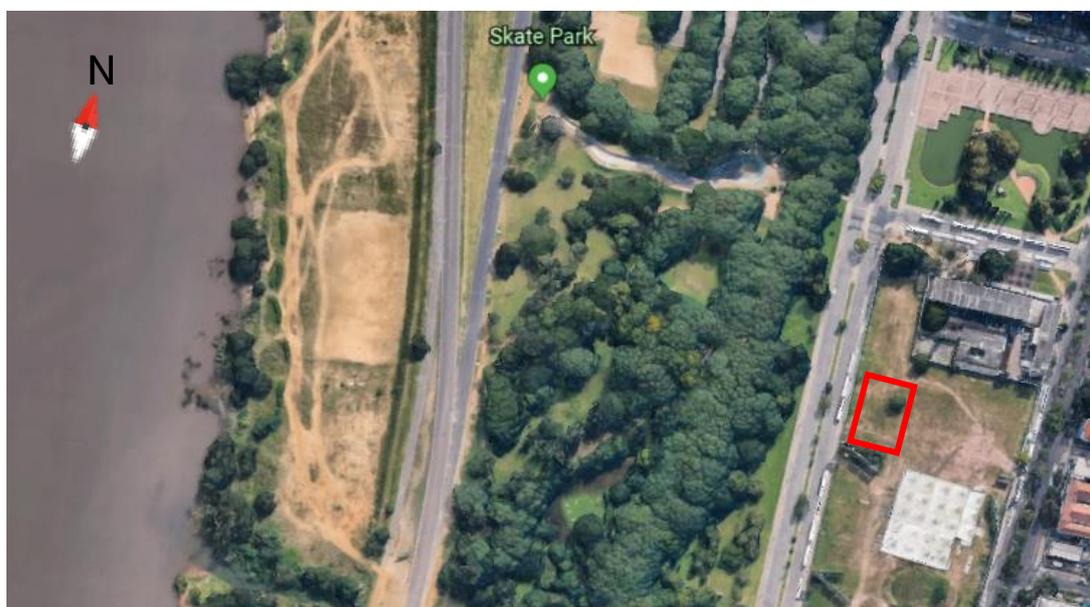
A edificação foi construída em 2015, com o intuito de ser um plantão de vendas de imóveis. Em 2019 o plantão passou a exercer atividades de escritório, com uma maior ocupação

por um período mais longo, sem, no entanto, sofrer alterações na sua envoltória. O horário de funcionamento do escritório é das 07h00 às 19h00.

#### 4.2.1 Localização e Orientação Solar

A edificação foi construída em frente ao Parque Marinha do Brasil – representada na Figura 7 pelo retângulo vermelho – e não existem edificações próximas que possam causar efeitos de sombreamento. Os ambientes da sala de escritório e da recepção estão voltados a sudoeste e noroeste respectivamente, recebendo raios solares no período da tarde. A cozinha, os WC – vestiários, as salas Comercial e Rede são voltadas a leste, recebendo incidência solar no período da manhã.

Figura 7: Localização da Edificação



(fonte: adaptada de Google Earth)

#### 4.3 MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO REAL

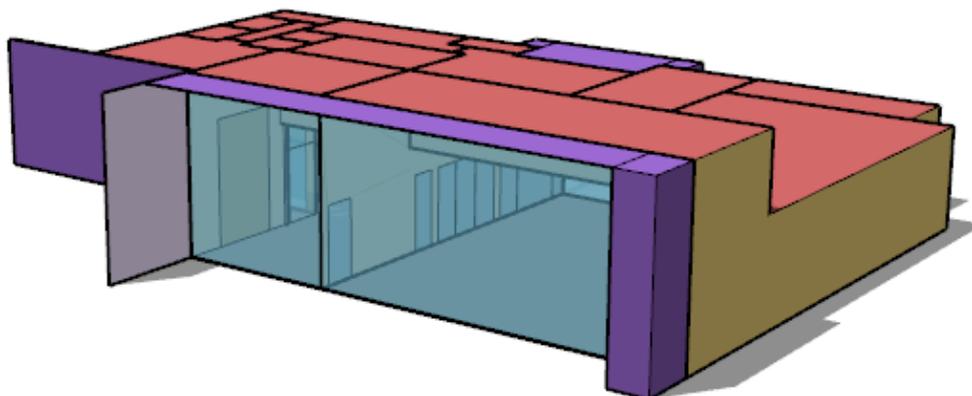
O escritório teve a sua geometria modelada no programa *Sketchup Pro 2017*, com a extensão *OpenStudio 2.9*. A seguir, estarão descritos todos os procedimentos de modelagem, desde o traçado da volumetria da edificação e definição do zoneamento térmico no programa de modelagem 3D, até a inserção dos dados no programa de simulação *EnergyPlus 9.2*.

### 4.3.1 Geometria e Zoneamento Térmico do Escritório

Segundo o *EnergyPlus*, zonas térmicas são definidas como um volume de ar à temperatura uniforme, com a envoltória composta de superfícies de trocas térmicas como paredes, pisos, tetos, portas e janelas.

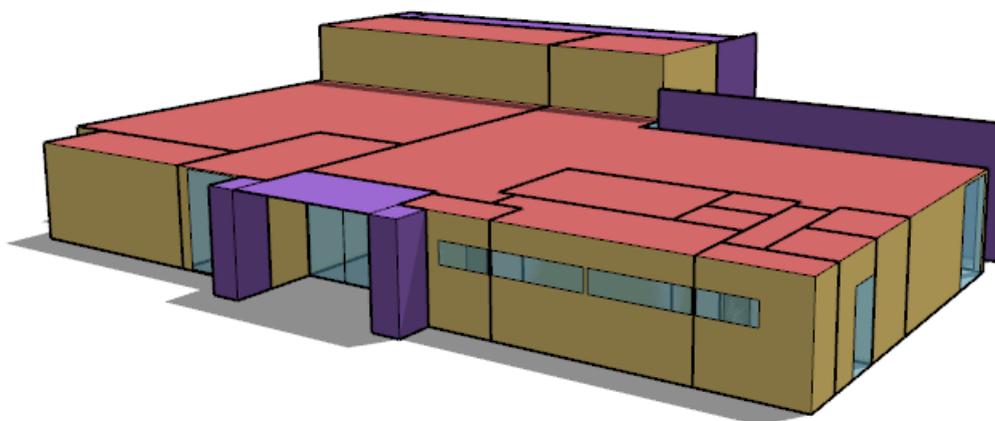
Após o levantamento e análise dos projetos executivos, descrito no item 4.2, foi possível traçar a geometria da edificação e criar o MOD-REAL. As Figuras 8 e 9 representam a geometria do escritório modeladas no programa *Sketchup*. Foram inseridos também os brises horizontais e verticais, modelados como superfícies de sombreamento, representados nas figuras em roxo.

Figura 8: Geometria do escritório – vista sudoeste



(fonte: elaborada pelo autor - *Sketchup*)

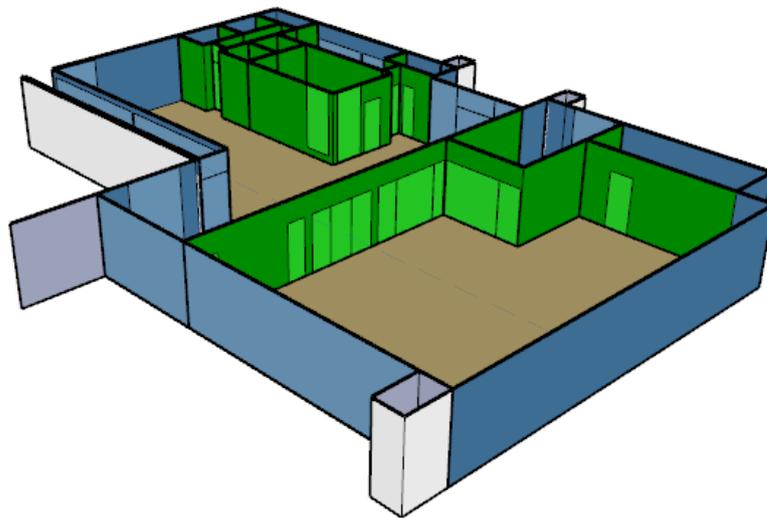
Figura 9: Geometria do escritório – vista nordeste



(fonte: elaborada pelo autor - *Sketchup*)

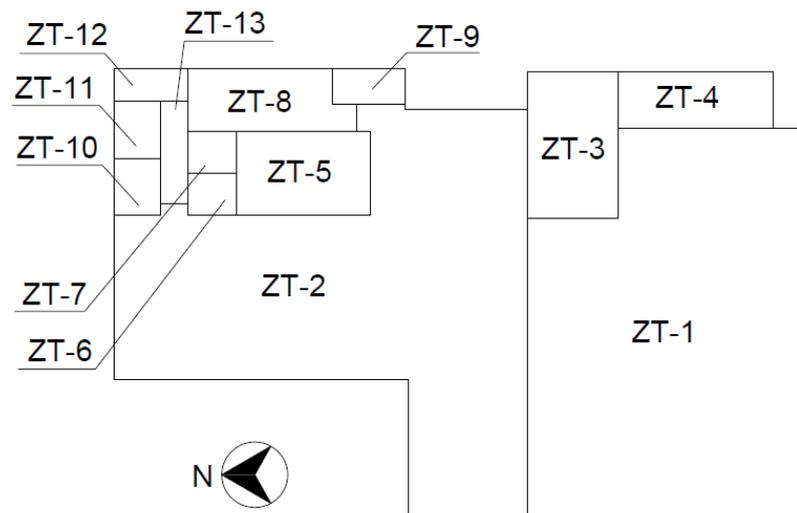
O zoneamento térmico foi feito através da extensão *OpenStudio*. Foi definida a opção de criar uma zona térmica a cada espaço gerado. Sendo assim, foram criadas treze zonas térmicas, uma para cada ambiente do escritório, aproximando-o à realidade. A Figura 10 apresenta uma vista em corte da edificação, identificando a repartição dos ambientes. As superfícies internas coloridas em verde representam as paredes, portas ou janelas onde ocorrem correspondências de superfícies (*surface matching*) entre duas zonas e é necessário definir as condições de limites externos apropriados. A Figura 11 apresenta a identificação de cada zona térmica e a Tabela 2 relaciona as zonas térmicas com os ambientes da edificação.

Figura 10: Zoneamento térmico do escritório – *Surface Matching*



(fonte: elaborada pelo autor – *Sketchup/OpenStudio*)

Figura 11: Zoneamento térmico do escritório



(fonte: elaborada pelo autor - AutoCAD)

Tabela 2: Zonas térmicas x ambientes

| Zona Térmica | Ambiente                |
|--------------|-------------------------|
| ZT-1         | Sala do Escritório      |
| ZT-2         | Recepção                |
| ZT-3         | Sala Comercial          |
| ZT-4         | Sala Rede               |
| ZT-5         | Sala de Reuniões        |
| ZT-6         | WC Feminino             |
| ZT-7         | WC Masculino            |
| ZT-8         | Cozinha                 |
| ZT-9         | WC Masculino -Vestiário |
| ZT-10        | WC PNE                  |
| ZT-11        | Depósito                |
| ZT-12        | WC Feminino - Vestiário |
| ZT-13        | Circulação              |

(fonte: elaborada pelo autor)

As zonas de longa permanência desse escritório são a ZT-1, ZT-2, ZT-3 e ZT-5.

#### 4.3.2 Materiais e Elementos Construtivos

A partir das informações descritas no item 4.1, foi possível determinar e confeccionar os elementos construtivos que compõem a envoltória da edificação (Tabela 3).

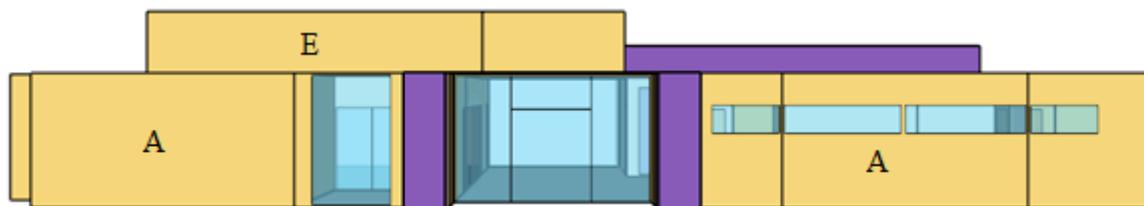
Tabela 3: Identificação dos elementos construtivos

| Identificação                                 | Elemento construtivo                |
|---|-------------------------------------|
| A, A*   | Parede Externa Branca/Cinza – 14 cm |
| B   | Parede Interna STD – 12 cm          |
| C   | Parede Interna Acústica – 12 cm     |
| D   | Parede Fibrocimento Marrom – 30 cm  |
| E   | Parede Impermeabilizada** – 15 cm   |
| F   | Piso                                |
| G   | Cobertura                           |
| *Parede A pintada de cinza                    |                                     |
| ** Parede revestida com uma manta aluminizada |                                     |

(fonte: elaborada pelo autor)

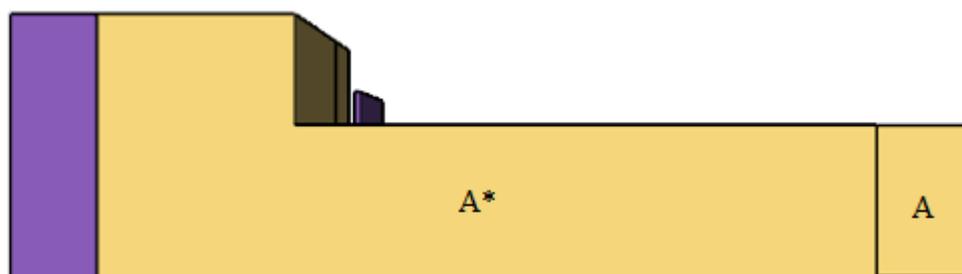
Para melhor representar os elementos construtivos na envoltória, as Figuras 12, 13 e 14 relacionam as paredes às identificações dos elementos construtivos. A fachada oeste não está representada, pois é composta globalmente pelo elemento A. O piso e a cobertura são na sua totalidade constituídos pelo elemento F e G, respectivamente. O Elemento C encontra-se envolvendo a sala de reuniões, enquanto o B representa as demais divisórias internas da edificação.

Figura 12: Identificação dos componentes da envoltória – fachada leste



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 13: Identificação dos componentes da envoltória – fachada sul



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 14: Identificação dos componentes da envoltória – fachada norte



(fonte: elaborada pelo autor)

#### 4.3.2.1 Propriedades Termo Físicas dos Materiais

A propriedade térmica de um material é a resposta ou reação do mesmo à aplicação de calor. A posse destas propriedades é importante para a análise do desempenho térmico, pois são os elementos construtivos que compõe o envelope da construção – separador físico do exterior e interior da edificação (WEBER, 2017).

As propriedades térmicas mais relevantes são: absorvância à radiação solar, refletância à radiação solar, transmitância à radiação solar, emissividade, condutividade térmica, resistência térmica total, transmitância térmica, capacidade térmica total e o atraso térmico. As propriedades termo físicas necessárias para a simulação no programa *EnergyPlus* são a

condutividade térmica ( $\lambda$ ), a densidade ( $\rho$ ), o calor específico ( $C_p$ ), a espessura da camada do material ( $e$ ) e resistência térmica ( $R$ ) - para as camadas de ar.

Os materiais presentes na edificação, identificados nas visitas ao local, tiveram as suas propriedades estimadas através da NBR 15220-2.

As resistências para as camadas de ar foram definidas de acordo com o componente analisado. Para as camadas internas às paredes, com fluxo horizontal de calor, o valor da resistência térmica definido pela norma é de  $0,17 \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$  – para camadas com mais de 5 cm de espessuras e internas a superfícies de alta emissividade. Para as camadas de ar presentes no elemento piso e cobertura, utilizou-se o valor de resistência térmica de  $0,21 \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$  – para camadas com mais de 5 cm de espessuras, internas a superfícies de alta emissividade e fluxo descendente.

O elemento “Parede Externa Impermeabilizada” apresenta uma camada formada por uma manta aluminizada. Para tal, foram utilizadas as propriedades térmicas do material manta asfáltica e uma absorvância solar para uma superfície aluminizada.

Para determinar as propriedades dos materiais que compõem o elemento “Piso”, utilizou-se a metodologia desenvolvida por Ordenes et al. (2003), encontrando uma composição equivalente, cujos cálculos encontram-se no Apêndice A. Como o piso é composto de um sistema de vigotas e telhas, encontrou-se uma composição equivalente formada por duas camadas de cerâmica, uma camada intermediária de ar e uma de concreto. Além disso, por estar elevado em 30 cm do solo, considerou-se uma camada de areia de mesma espessura até a camada inferior da laje.

Para a cobertura, utilizou-se o procedimento descrito na NBR 15220-2 para simplificar as coberturas, cuja demonstração encontra-se no Apêndice A.

A Tabela 4 apresenta a relação dos materiais presentes em cada camada dos elementos construtivos e as suas propriedades termo físicas. Os cálculos de transmitância térmica para cada elemento construtivo encontram-se no Apêndice A.

As superfícies expostas ao sol necessitam de entradas de absorvância solar ( $\alpha$ ) no programa. As paredes exteriores são pintadas de branco e de cinza, enquanto a parede de fibrocimento apresenta uma coloração amarronzada. Os valores de absorvância solar empregados foram retirados da NBR 15220-2 (para a coloração branca e cinza e a superfície aluminizada da parede impermeabilizada), do Anexo V do INMETRO (2013) (para a coloração amarronzada da parede de fibrocimento, adotando o valor de uma tinta tabaco) e da dissertação de mestrado de Dias (2011) para a absorvância de uma telha sanduíche de aço galvanizado. Optou-se em adotar o valor definido por Dias, pois a NBR 15220-2 apresenta apenas um valor de absorvância térmica para uma chapa

de aço galvanizado nova e brilhante, não sendo o caso da edificação em estudo. Os valores de absorvância térmica encontram-se na Tabela 5.

Tabela 4: Elementos construtivos e propriedades termo físicas dos materiais presentes em cada camada

| Identificação                           | Camadas/<br>Materiais | Propriedades         |                             |                |          |                            |                            |
|---|-----------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|----------|----------------------------|----------------------------|
|   |                       | $\lambda$<br>(W/m.K) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Cp<br>(J/kg.K) | e<br>(m) | R<br>(m <sup>2</sup> .K/W) | U<br>(W/m <sup>2</sup> .K) |
| A, A*<br>Parede Externa<br>Branca/Cinza | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            | 2,433                      |
|   | Camada de ar          |                      |                             |                |          | 0,17                       |                            |
|   | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            |                            |
| B<br>Parede Interna STD                 | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            | 2,433                      |
|   | Camada de ar          |                      |                             |                |          | 0,17                       |                            |
|   | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            |                            |
| C<br>Parede Interna<br>Acústica         | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            | 0,425                      |
|   | Lã de rocha           | 0,045                | 110                         | 750            | 0,095    |                            |                            |
|   | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            |                            |
| D<br>Parede Fibrocimento<br>Marrom      | Fibrocimento          | 0,65                 | 1800                        | 840            | 0,01     |                            | 2,697                      |
|   | Camada de ar          |                      |                             |                |          | 0,17                       |                            |
|   | Fibrocimento          | 0,65                 | 1800                        | 840            | 0,01     |                            |                            |
| E<br>Parede<br>Impermeabilizada         | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            | 2,356                      |
|   | Camada de ar          |                      |                             |                |          | 0,17                       |                            |
|   | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,0125   |                            |                            |
|   | Manta asfáltica       | 0,23                 | 1050                        | 1460           | 0,003    |                            |                            |
| F<br>Piso                               | Areia                 | 0,3                  | 1500                        | 2090           | 0,55     |                            | 2,427                      |
|   | Cerâmica              | 0,9                  | 1077.4                      | 920            | 0,037    |                            |                            |
|   | Camada de ar          |                      |                             |                |          | 0,21                       |                            |
|   | Cerâmica              | 0,9                  | 1077.4                      | 920            | 0,037    |                            |                            |
|   | Concreto              | 1,75                 | 2300                        | 1000           | 0,05     |                            |                            |
| G<br>Cobertura                          | Gesso                 | 0,35                 | 875                         | 840            | 0,02     |                            | 0,815                      |
|   | Ar                    |                      |                             |                |          | 0,21                       |                            |
|   | Aço Galvanizado       | 55                   | 7800                        | 460            | 0,005    |                            |                            |
|   | Poliestireno          | 0,04                 | 25                          | 1420           | 0,03     |                            |                            |
|   | Aço Galvanizado       | 55                   | 7800                        | 460            | 0,005    |                            |                            |

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 5: Absortância para radiação solar

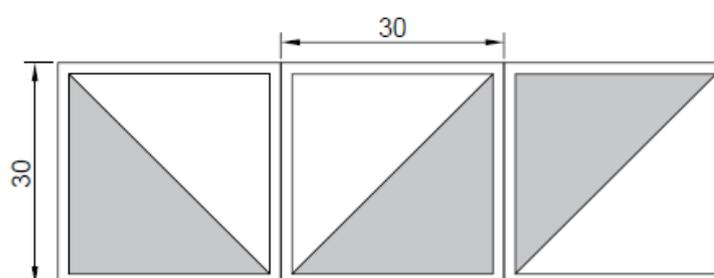
| Tipo de superfície | $\alpha$ |
|--------------------|----------|
| Pintura cinza      | 0,611    |
| Pintura branca     | 0,2      |
| Pintura marrom     | 0,781    |
| alumínio           | 0,4      |
| aço galvanizado    | 0,4      |

(fonte: elaborada pelo autor)

O vidro utilizado em todo o modelo real é de 10mm com Fator Solar igual a 0,75 (SAINT GOBAIN GLASS, 2000, p. 562). A porcentagem de abertura da fachada total é de 37% e da fachada oeste de 87% (Apêndice B), sendo a área total de abertura igual a 121,75 m<sup>2</sup>.

Para modelar a superfície de sombreamento vertical formada por cobogós, utilizou-se um *schedule compact* no programa *Energyplus*, atribuindo um valor de opacidade de 50% e aplicado a todas as horas do dia, todos os dias do ano. Esse valor é uma aproximação do real, visto que essa superfície é formada por pequenos módulos (cobogós) quadrangulares subdivididos pela diagonal do quadrado, formando dois triângulos – um preenchido por concreto e o outro vazado, conforme Figura 15.

Figura 15: Representação esquemática dos módulos de cobogós



(fonte: elaborada pelo autor - AutoCAD)

### 4.3.3 Cargas Térmicas Internas

As cargas internas são compreendidas pelo calor liberado pelas pessoas, equipamentos elétricos, iluminação e infiltração de ar, as quais têm grande influência na carga térmica do ambiente, além das condições ambientais externas, micro-clima da zona e dos elementos construtivos do prédio (CAROTENUTO, 2009).

Para determinar as cargas térmicas internas da edificação real, fez-se uma análise da potência de iluminação instalada, de equipamentos e da ocupação. Definiu-se, assim, *schedules* para cada um deles e para cada Zona Térmica da edificação, aproximando o modelo real à utilização do escritório. Os próximos itens apresentam essas definições bem como os valores utilizados como entrada no programa *EnergyPlus*. Os *schedules* apresentados a seguir fazem referência apenas às zonas condicionadas, com exceção dos *schedules* dos equipamentos. Os demais estão representados no Apêndice C.

#### 4.3.3.1 Sistemas de Iluminação

Os sistemas de iluminação do escritório apresentam circuitos fechados, ou seja, cada ambiente fechado por paredes até o teto apresenta no mínimo um acionamento independente para a iluminação interna do ambiente. Para as primeiras fileiras de iluminação paralelas às aberturas há um controle independente para acionamento manual, não existindo desligamento automático. Considerou-se nesses casos, para fins de simulação, a situação com todas as luzes acesas.

A auditoria realizada no escritório levantou todas as lâmpadas instaladas nos ambientes e as suas propriedades foram determinadas a partir dos projetos elétricos executivos. A Tabela 6 apresenta o sistema de iluminação de cada zona e a potência dissipada total em watts.

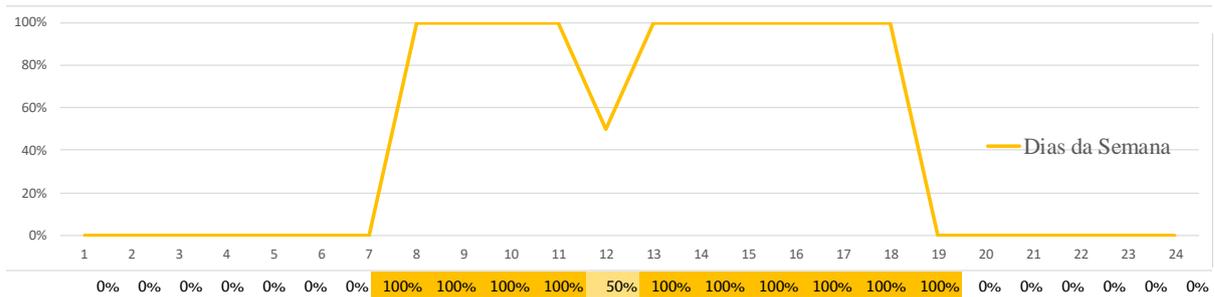
Tabela 6: Sistemas de Iluminação x Potência Total Dissipada por Zona Térmica

| Zona                       | Área (m <sup>2</sup> ) | Lâmpadas      | Quantidade | Potência dissipada (W) | Potência dissipada Total (W) | Densidade de Potência de Iluminação (W/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|------------------------|---------------|------------|------------------------|------------------------------|---|
| 1 Sala do Escritório       | 136,69                 | 4 T5 - 14W    | 21         | 56                     | 1901                         | 13,91   |
|                            |                        | DICROICA LED  | 10         | 50                     |                              |   |
|                            |                        | CDMR PAR 30   | 3          | 75                     |                              |   |
| 2 Recepção                 | 137,74                 | DICROICA LED  | 11         | 50                     | 2150                         | 15,61   |
|                            |                        | PAR 20 LED    | 14         | 50                     |                              |   |
|                            |                        | CDMR PAR 30   | 8          | 75                     |                              |   |
|                            |                        | HALÓGENA AR70 | 6          | 50                     |                              |   |
| 3 Sala Comercial           | 18,05                  | 4 T5 - 14W    | 2          | 56                     | 212                          | 11,75   |
|                            |                        | DICROICA LED  | 2          | 50                     |                              |   |
| 4 Sala Rede                | 11,91                  | 2 T8 - 32W    | 2          | 64                     | 128                          | 10,75   |
| 5 Sala de Reuniões         | 15,19                  | CDMR PAR 30   | 4          | 75                     | 324                          | 21,33   |
|                            |                        | LED BULBO     | 2          | 12                     |                              |   |
| 6 WC Feminino              | 2,79                   | 2 E27 - 20W   | 2          | 40                     | 80                           | 28,67   |
| 7 WC Masculino             | 2,90                   | 2 E27 - 20W   | 2          | 40                     | 80                           | 27,59   |
| 8 Cozinha                  | 13,04                  | 2 TLD 32W     | 2          | 64                     | 128                          | 9,82  |
| 9 WC Masculino - Vestiário | 3,51                   | DICROICA LED  | 2          | 50                     | 150                          | 42,74   |
|                            |                        | HALÓGENA AR70 | 1          | 50                     |                              |   |
| 10 WC PNE                  | 3,70                   | 2 E27 - 20W   | 1          | 40                     | 40                           | 10,81   |
| 11 Depósito                | 3,57                   | 2 E27 - 20W   | 1          | 40                     | 40                           | 11,20   |
| 12 WC Feminino - Vestiário | 3,24                   | DICROICA LED  | 2          | 50                     | 150                          | 46,30   |
|                            |                        | HALÓGENA AR70 | 1          | 50                     |                              |   |
| 13 Circulação              | 3,78                   | DICROICA LED  | 4          | 50                     | 200                          | 52,91   |

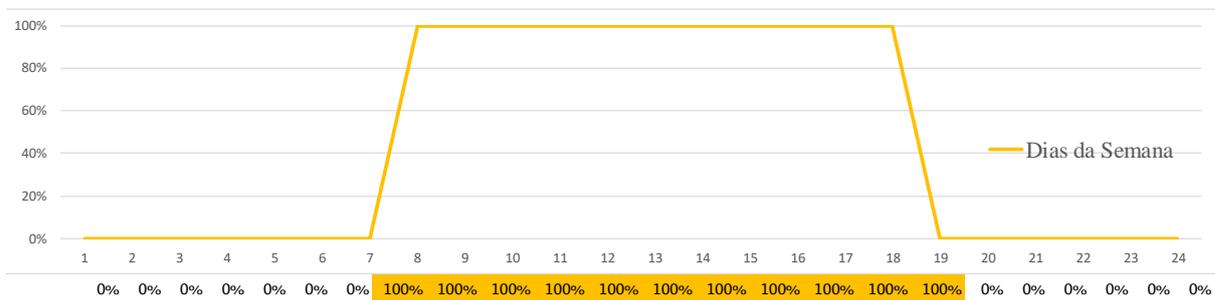
(fonte: elaborada pelo autor)

No programa *EnergyPlus*, deve-se inserir os valores das frações radiante e visível referentes aos sistemas de iluminação. Adotou-se neste trabalho os valores definidos por Melo, Westphal e Matos (2009, p. 18), sendo 0,72 para a fração radiante e 0,18 para a visível.

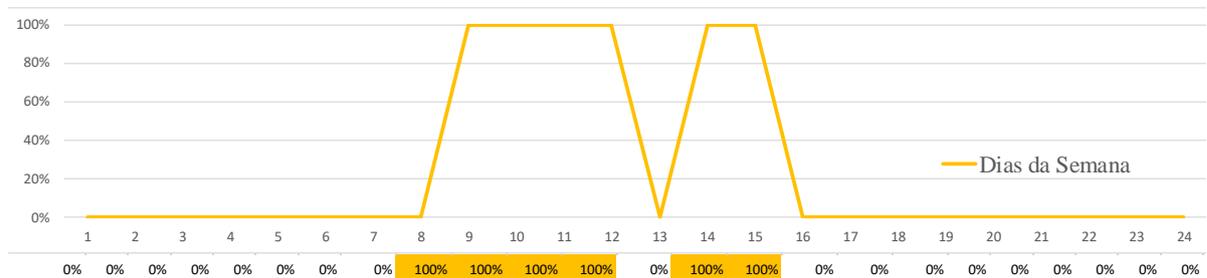
A seguir, estão representadas as Figuras 16, 17 e 18, identificando a operação dos sistemas de iluminação nas quatro zonas de longa permanência.

Figura 16: *Schedule* de Iluminação – Sala do Escritório e Sala Comercial

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 17: *Schedule* de Iluminação – Recepção

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 18: *Schedule* de Iluminação – Sala de Reuniões

(fonte: elaborada pelo autor)

#### 4.3.3.2 Equipamentos

A carga de equipamentos instalados na edificação foi determinada a partir de uma auditoria no local. Todos os equipamentos foram especificados e o valor de potência para cada tipologia de equipamento foi estimado a partir de uma média das potências de equipamentos semelhantes. Para alguns equipamentos presentes na cozinha, foi realizada uma simplificação, definindo a potência de acordo com a razão entre as horas que o equipamento permanece ligado e as horas de utilização da edificação. A Tabela 7 apresenta a listagem de equipamentos instalados por zona térmica, a potência dissipada em watts por cada um deles e a potência total

dissipada por zona. As Figuras 19, 20 e 21 identificam o período de utilização dos equipamentos no escritório.

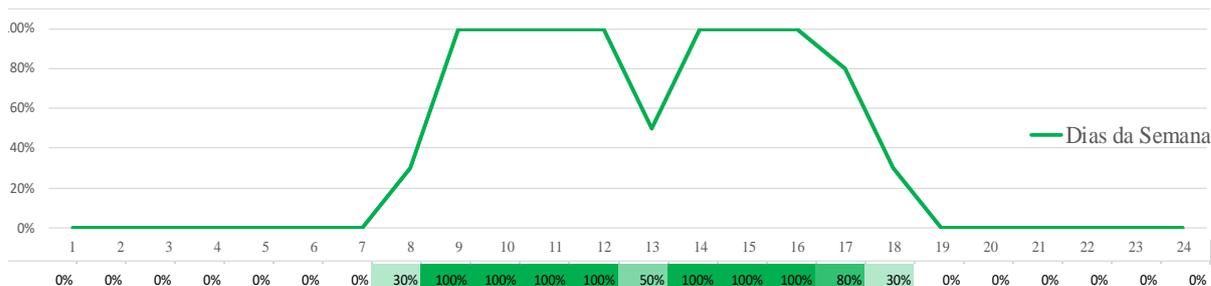
Tabela 7: Equipamentos instalados x Potência Total Dissipada por Zona Térmica

| Zona | Equipamentos             | Quantidade          | Potência dissipada (W) | Potência dissipada Total (W) | Densidade de Potência de Equipamentos (W/m <sup>2</sup> ) |        |
|------|--------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|---|--------|
| 1    | Sala do Escritório       | Computador          | 9                      | 75                           | 3757  | 27,49  |
|      |                          | Monitor 17"         | 21                     | 35                           |   |        |
|      |                          | Notebook            | 35                     | 65                           |   |        |
|      |                          | Impressora          | 2                      | 15                           |   |        |
|      |                          | Telefone            | 14                     | 3                            |   |        |
| 2    | Recepção                 | Computador          | 1                      | 75                           | 476   | 3,46   |
|      |                          | Monitor             | -                      | -                            |   |        |
|      |                          | Notebook            | 4                      | 65                           |   |        |
|      |                          | Telefone            | 2                      | 3                            |   |        |
|      |                          | Televisão 50'       | 1                      | 135                          |   |        |
| 3    | Sala Comercial           | Notebook            | 7                      | 65                           | 575   | 31,86  |
|      |                          | Televisão 32'       | 1                      | 120                          |   |        |
| 4    | Sala Rede                | Equipamentos        | 1                      | 2000                         | 2000  | 167,93 |
| 5    | Sala de Reuniões         | Notebook            | 2                      | 65                           | 250   | 16,46  |
|      |                          | Televisão 32'       | 1                      | 120                          |   |        |
| 6    | WC Feminino              | -                   | -                      | -                            | -   | -      |
| 7    | WC Masculino             | -                   | -                      | -                            | -   | -      |
| 8    | Cozinha                  | Microondas*         | 2                      | 100                          | 910   | 69,79  |
|      |                          | Chaleira Elétrica** | 1                      | 250                          |   |        |
|      |                          | Cafeteira***        | 1                      | 200                          |   |        |
|      |                          | Geladeira           | 2                      | 130                          |   |        |
| 9    | WC Masculino - Vestiário | -                   | -                      | -                            | -   | -      |
| 10   | WC PNE                   | -                   | -                      | -                            | -   | -      |
| 11   | Depósito                 | -                   | -                      | -                            | -   | -      |
| 12   | WC Feminino - Vestiário  | -                   | -                      | -                            | -   | -      |
| 13   | Circulação               | -                   | -                      | -                            | -   | -      |

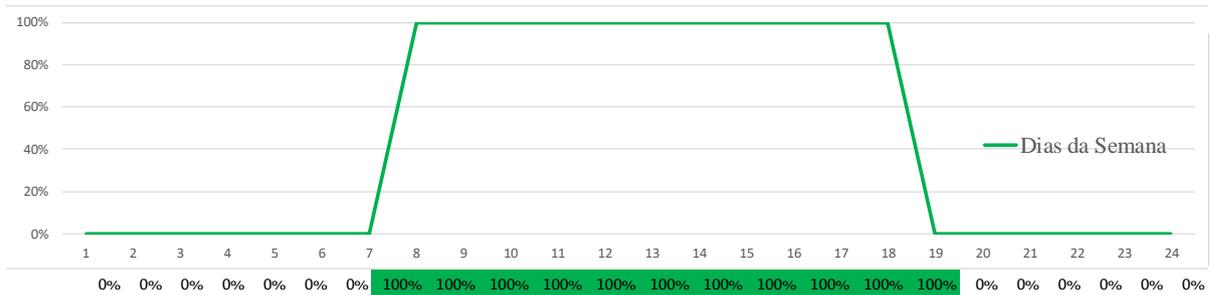
\*considerou-se uma hora de utilização diária P=1200W  
 \*\*considerou-se duas horas de utilização diária P=1500W  
 \*\*\*considerou-se 4 horas de utilização diária P=600W

(fonte: elaborada pelo autor)

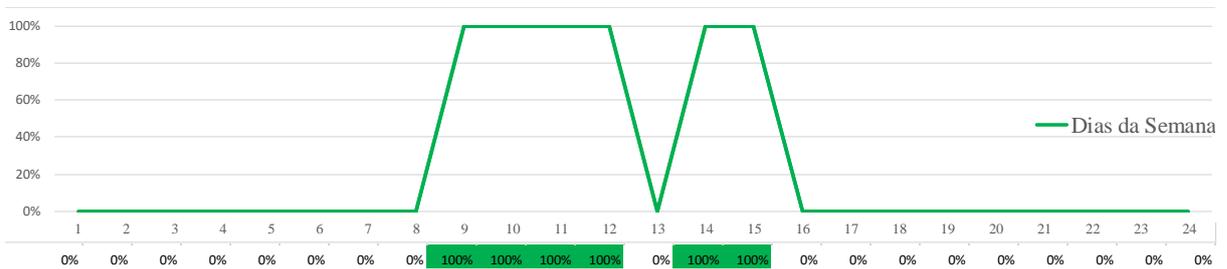
Figura 19: Schedule de Utilização dos Equipamentos – Sala do Escritório e Sala Comercial



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 20: *Schedule* de Utilização dos Equipamentos – Recepção, Sala Rede e Cozinha

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 21: *Schedule* de Utilização dos Equipamentos – Sala de Reunião

(fonte: elaborada pelo autor)

#### 4.3.3.3 Ocupação – Pessoas

Para determinar a quantidade de pessoas que trabalham e frequentam o escritório, foi feito um acompanhamento das atividades da edificação. Assim, definiu-se o número de pessoas por zona térmica (Tabela 8) e a rotina delas foi representada através de *schedules* na simulação.

Tabela 8: Ocupação das Zonas Térmicas

| Zona | nº de pessoas            |    |
|------|--------------------------|----|
| 1    | Sala do Escritório       | 46 |
| 2    | Recepção                 | 6  |
| 3    | Sala Comercial           | 7  |
| 4    | Sala Rede                | 0  |
| 5    | Sala de Reuniões         | 6  |
| 6    | WC Feminino              | 1  |
| 7    | WC Masculino             | 1  |
| 8    | Cozinha                  | 10 |
| 9    | WC Masculino - Vestiário | 1  |
| 10   | WC PNE                   | 1  |
| 11   | Depósito                 | 0  |
| 12   | WC Feminino - Vestiário  | 1  |
| 13   | Circulação               | 0  |

(fonte: elaborada pelo autor)

Os *schedules* das zonas de longa permanência estão representados a seguir (Figuras 22, 23 e 24). Os demais encontram-se no Apêndice C, juntamente com os de Iluminação.

Figura 22: Schedule de Ocupação – Sala do Escritório e Sala Comercial



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 23: Schedule de Ocupação – Sala de Reuniões



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 24: Schedule de Ocupação - Recepção



(fonte: elaborada pelo autor)

É imprescindível a determinação do tipo de atividade exercida pelas pessoas para definir as taxas metabólicas e o calor dissipado por elas. Dessa forma, analisou-se a rotina das pessoas no escritório e buscou-se taxas metabólicas semelhantes na ASHRAE 55. Como os ocupantes do escritório não exercem a mesma atividade durante todo o período, definiu-se uma média ponderada pelo tempo. Foram definidas as atividades “lendo, sentado” (taxa metabólica de 55 W/m<sup>2</sup>), “digitando, sentado” (70 W/m<sup>2</sup>) e “caminhando” (100 W/m<sup>2</sup>), ponderando por 50%, 40% e 10% respectivamente. Assim, a média ponderada das taxas foi definida em 65,5 W/m<sup>2</sup>. Como este valor é dado por m<sup>2</sup> de pele de uma pessoa, o valor deve ser multiplicado por 1,8 –

área de superfície corporal padrão de um adulto (EnergyPlus, 2019c) – sendo igual a 117,9 W. É necessário ainda inserir o valor da fração radiante, como entrada na simulação. O valor utilizado foi 0,30 – padrão definido pelo EnergyPlus (2019c).

#### 4.3.3.4 Infiltração de Ar

Para a simulação de infiltração de ar na edificação, utilizou-se o módulo *AirflowNetwork* presente na família de modelos do *EnergyPlus*. Os parâmetros de entrada utilizados foram o coeficiente de fluxo de ar por frestas (CQ) de 0,001 kg/s.m e o expoente do fluxo de ar (n) de 0,65. Esses são os valores padrões estipulados pelo *EnergyPlus* e são também recomendados pelo RTQ-R para janelas e portas retangulares (para simulação de ventilação natural). O programa computacional utilizado permite modelar um sistema que considera as esquadrias sempre fechadas, calculando apenas a infiltração pelas frestas.

#### 4.3.4 Sistemas de Condicionamento de Ar

Nesta edificação, estão instalados sistemas de climatização nos quatro ambientes de longa permanência e na Sala Rede. Nas Salas Comercial, Rede e de Reuniões estão instalados condicionadores de ar split hi-wall, enquanto na Recepção e na Sala do Escritório estão instalados condicionadores de ar split cassette. Todos os condicionadores de ar são independentes e apresentam um coeficiente de performance (COP) igual a 3,03 – regulamentados pelo INMETRO e com um nível B de Eficiência Energética.

Para a simulação de condicionamento de ar, utilizou-se o módulo *PTHP* – bombas de calor - do *EnergyPlus*, no formato de auto dimensionamento. Os coeficientes de performance das máquinas foram inseridos como entradas. Foi estabelecido um termostato de 20°C para aquecimento e de 24°C para resfriamento e um *schedule* de funcionamento do sistema, operando das 07h00 às 19h00. A renovação de ar dos ambientes condicionados foi determinada em 27m<sup>3</sup>/hora/pessoa, de acordo com a Resolução-RE nº 9 da ANVISA (2003). Foram estipulados dias de projeto para o verão e para o inverno, oriundos do arquivo climático de Porto Alegre.

O arquivo considera o dia 21 de janeiro como dia de projeto de verão, com frequência de ocorrência cumulativa anual de 0,4 % das 8760 horas. Dessa forma, entende-se que abaixo da frequência de ocorrência cumulativa escolhida para o dia de projeto, o sistema de ar condicionado pode não ter capacidade de operação suficiente para garantir a temperatura média do ar da zona na

temperatura de controle do termostato. Para o dia de projeto de inverno, o arquivo considera o dia 21 de julho com uma frequência cumulativa anual de 99,6% das 8760 horas. Assim, entende-se que acima da frequência de ocorrência cumulativa escolhida para o dia de projeto, o sistema de ar condicionado pode não ter capacidade de operação suficiente para garantir a temperatura média do ar da zona na temperatura de controle do termostato.

O RTQ-C estipula que a capacidade do sistema de condicionamento de ar deve ser dimensionada para que no máximo 10% das horas de ocupação não sejam atendidas. Portanto, os sistemas de condicionamento de ar foram auto dimensionados para atender esse parâmetro.

#### 4.4 MODELAGEM DAS EDIFICAÇÕES DE REFERÊNCIA

Para desenvolver os quatro modelos de referência, o RTQ-C define algumas considerações quanto à geometria, envoltória, sistemas de iluminação e de condicionamento de ar. Os níveis de eficiência energética estão sempre referenciados de acordo com a sua respectiva cor, ou seja, nível A em verde escuro, nível B em verde claro, nível C em amarelo, nível D em laranja e nível E em vermelho.

##### 4.4.1 Geometria

A Geometria dos modelos de referência deve ser semelhante ao modelo real. No entanto, a envoltória deve atingir o nível de eficiência pretendido para cada caso. Dessa forma, o RTQ-C propõe o cálculo do Indicador de Consumo da envoltória ( $IC_{env}$ ) da edificação real e dos modelos de referência, cujos cálculos encontram-se no Apêndice B. O  $IC_{env}$  obtido deve ser comparado a uma escala numérica dividida em intervalos que descrevem o nível de classificação de desempenho energético, que varia de A a E. Quanto menor o indicador obtido, mais eficiente energeticamente será a envoltória da edificação. A partir dos índices, encontra-se o valor do Percentual de Abertura na Fachada total ( $PAF_T$ ), diferente para cada um dos níveis.

##### 4.4.1.1 Definição das Aberturas nos Modelos de Referência

Tendo em mãos os cálculos do  $PAF_T$  para cada modelo de referência, obtidos no Apêndice B e expressos na Tabela 9, é possível determinar as áreas de abertura nas fachadas dos modelos de referência, através da Equação 1.

Tabela 9:  $PAF_T$  dos modelos de referência

| A      | B      | C      | D      |
|--------|--------|--------|--------|
| 0,1709 | 0,2918 | 0,4126 | 0,5335 |

(fonte: elaborada pelo autor)

$$PAF_T = \frac{\text{Área de aberturas envidraçadas}}{\text{Área total de fachada}} \quad \text{Equação (1)}$$

A área total de fachada encontra-se descrita na Tabela 10. Com os dados obtidos de área de abertura para cada nível de eficiência energética (Tabela 11), fez-se uma comparação com o MOD-REAL, para definir assim porcentagens de abertura para cada modelo de referência. Por fim, foi determinada a metragem quadrada de aberturas envidraçadas para cada fachada dos modelos de referência (Tabela 12).

Tabela 10: Área total por fachada da edificação real

| Fachada       | A (m <sup>2</sup> ) |
|---------------|---------------------|
| Fachada Norte | 59,72               |
| Fachada Leste | 103,78              |
| Fachada Sul   | 59,72               |
| Fachada Oeste | 103,78              |
| Total         | 326,99              |

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 11: Área envidraçada de aberturas por nível

| A                    | B                    | C                     | D                     |
|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 55,88 m <sup>2</sup> | 95,40 m <sup>2</sup> | 134,93 m <sup>2</sup> | 174,45 m <sup>2</sup> |

(fonte: elaborada pelo autor)

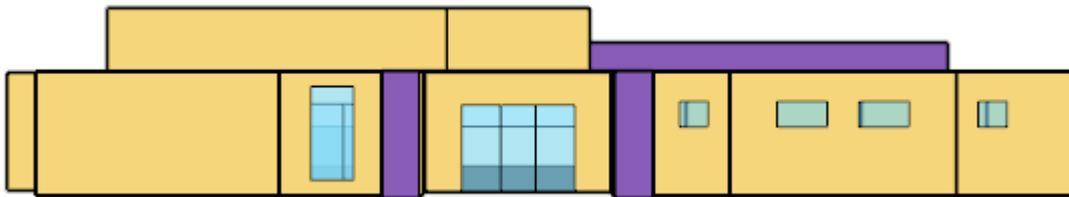
Tabela 12: Área envidraçada por fachada para os Modelos de Referência

| Fachada       | Área (m <sup>2</sup> ) | Área de vidro dos modelos (m <sup>2</sup> ) |       |       |        |         |
|---------------|------------------------|---|-------|-------|--------|---------|
|               |                        | REAL  | A     | B     | C      | D       |
| Fachada Oeste | 103,78                 | 89,79                                       | 41,21 | 70,36 | 99,51  | 128,660 |
| Fachada Norte | 59,72                  | 10,09                                       | 4,63  | 7,91  | 11,18  | 14,46   |
| Fachada Leste | 103,78                 | 21,87                                       | 10,04 | 17,14 | 24,24  | 31,34   |
| Fachada Sul   | 59,72                  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00    |
| TOTAL         | 326,99                 | 121,75                                      | 55,88 | 95,40 | 134,93 | 174,45  |

(fonte: elaborada pelo autor)

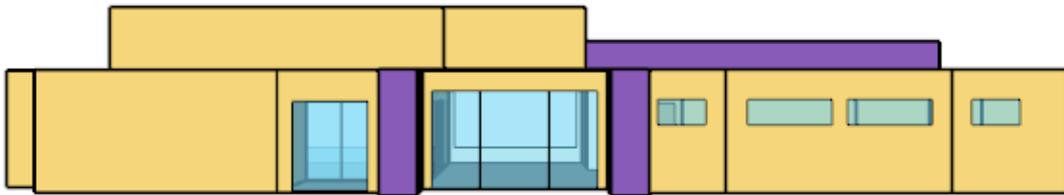
Os modelos de referência, apesar de possuírem um  $PAF_T$  diferente, devem possuir aberturas distribuídas de acordo com o MOD-REAL, ou seja, terão aberturas apenas nas fachadas oeste, norte e leste e nos mesmos ambientes que o MOD-REAL, respeitando as suas proporções. Os quatro modelos foram desenhados no programa de computador *Sketchup* com a extensão *OpenStudio*, como o MOD-REAL. As Figuras 25, 26, 27 e 28 ilustram a geometria dos modelos de referência e as aberturas envidraçadas da fachada leste para cada um deles.

Figura 25: MOD-REF-A – fachada leste



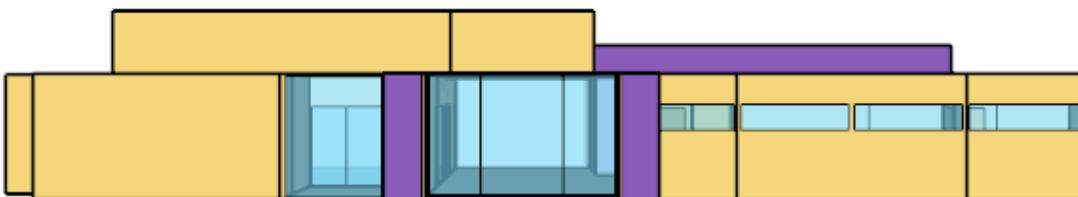
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 26: MOD-REF-B – fachada leste



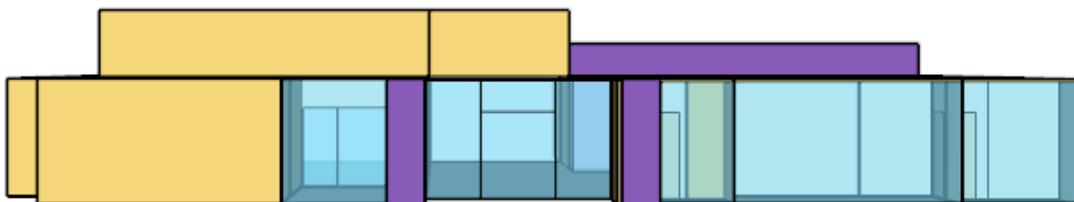
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 27: MOD-REF-C – fachada leste



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 28: MOD-REF-D – fachada leste



(fonte: elaborada pelo autor)

Segundo o RTQ-C, os modelos de referência não devem ser modelados com proteções solares, tais como brises e marquises. No entanto, quando o sombreamento é causado por outros elementos da edificação, esses elementos devem ser representados. Nos modelos de referência do escritório em questão, foram considerados os mesmos elementos de sombreamento do MOD-REAL, pois todos eles são elementos constituintes da edificação. O dispositivo de sombreamento composto por cobogós também foi considerado na modelagem, por definição do trabalho.

#### 4.4.2 Materiais Construtivos e Envoltória

Os elementos construtivos dos modelos de referência detêm parâmetros térmicos estabelecidos pelo RTQ-C. Cada nível possui valores de transmitância térmica e absorvância à radiação solar específicos para os componentes referentes a cada zona bioclimática brasileira. Contudo, o RTQ-C não estabelece a tipologia de material que deve ser empregado. O Quadro 1 resume as propriedades térmicas prescritas para a envoltória (cobertura e paredes) de cada modelo de referência para a Zona Bioclimática 3.

Quadro 1: Propriedades Térmicas da envoltória x Nível de Eficiência Energética para a Zona Bioclimática 3

| Propriedades Térmicas da Envoltória - Zona Bioclimática 3      |                             |                         |                             |                         |                             |
|--|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| NÍVEL A  |                             | NÍVEL B                 |                             | NÍVEIS C e D            |                             |
| Transmitância térmica da Cobertura ( $U_{cob}$ )               |                             |                         |                             |                         |                             |
| Ambientes condicionados  | Ambientes não condicionados | Ambientes condicionados | Ambientes não condicionados | Ambientes condicionados | Ambientes não condicionados |
| 1,0  | 2,0                         | 1,5                     | 2,0                         | 2,0                     |                             |
| Transmitância térmica das Paredes ( $U_{par}$ )                |                             |                         |                             |                         |                             |
| 3,7  |                             |                         |                             |                         |                             |
| Absorvância de Superfícies ( $\alpha_{par}$ e $\alpha_{cob}$ ) |                             |                         |                             |                         |                             |
| 0,5  |                             |                         |                             | 0,7                     |                             |

(fonte: elaborado pelo autor)

Os materiais que constituem os elementos construtivos utilizados nos modelos de referência foram retirados da dissertação de Fernandes (2012, p. 73 e 74). Utilizou-se uma parede de tijolos cerâmicos e uma cobertura de laje de concreto com isolamento térmico em poliestireno. Os componentes construtivos, as composições (camadas) e os valores de transmitância térmica encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2: Componentes construtivos da envoltória dos modelos de referência e as suas propriedades termo físicas

| Identificação                      | Camadas/Materiais      | Propriedades         |                             |                |          |                            |
|------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------|----------|----------------------------|
|                                    |                        | $\lambda$<br>(W/m.K) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Cp<br>(J/kg.K) | e<br>(m) | U<br>(W/m <sup>2</sup> .K) |
| <b>NÍVEL A</b>                     |                        |                      |                             |                |          |                            |
| Paredes                            | Tijolo cerâmico        | 0,9                  | 1600                        | 920            | 0,0925   | 3,70                       |
| Cobertura<br>(ar condicionado)     | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     | 1,00                       |
|                                    | Poliestireno extrudado | 0,035                | 40                          | 1400           | 0,02505  |                            |
|                                    | Concreto               | 1,75                 | 2200                        | 1000           | 0,1      |                            |
|                                    | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     |                            |
| Cobertura<br>(sem ar condicionado) | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     | 2,00                       |
|                                    | Poliestireno extrudado | 0,035                | 40                          | 1400           | 0,00754  |                            |
|                                    | Concreto               | 1,75                 | 2200                        | 1000           | 0,1      |                            |
|                                    | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     |                            |
| <b>NÍVEL B</b>                     |                        |                      |                             |                |          |                            |
| Paredes                            | Tijolo cerâmico        | 0,9                  | 1600                        | 920            | 0,0925   | 3,70                       |
| Cobertura<br>(ar condicionado)     | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     | 1,50                       |
|                                    | Poliestireno extrudado | 0,035                | 40                          | 1400           | 0,01338  |                            |
|                                    | Concreto               | 1,75                 | 2200                        | 1000           | 0,1      |                            |
|                                    | Reboco interno         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     |                            |
| Cobertura<br>(sem ar condicionado) | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     | 2,00                       |
|                                    | Poliestireno extrudado | 0,035                | 40                          | 1400           | 0,00754  |                            |
|                                    | Concreto               | 1,75                 | 2200                        | 1000           | 0,1      |                            |
|                                    | Reboco interno         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     |                            |
| <b>NÍVEL C</b>                     |                        |                      |                             |                |          |                            |
| Paredes                            | Tijolo cerâmico        | 0,9                  | 1600                        | 920            | 0,0925   | 3,70                       |
| Cobertura                          | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     | 2,00                       |
|                                    | Poliestireno extrudado | 0,035                | 40                          | 1400           | 0,00754  |                            |
|                                    | Concreto               | 1,75                 | 2200                        | 1000           | 0,1      |                            |
|                                    | Reboco interno         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     |                            |
| <b>NÍVEL D</b>                     |                        |                      |                             |                |          |                            |
| Paredes                            | Tijolo cerâmico        | 0,9                  | 1600                        | 920            | 0,0925   | 3,70                       |
| Cobertura                          | Reboco externo         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     | 2,00                       |
|                                    | Poliestireno extrudado | 0,035                | 40                          | 1400           | 0,00754  |                            |
|                                    | Concreto               | 1,75                 | 2200                        | 1000           | 0,1      |                            |
|                                    | Reboco interno         | 1,15                 | 2000                        | 1000           | 0,01     |                            |

(fonte: elaborado pelo autor)

### 4.4.3 Cargas Térmicas Internas

As cargas térmicas internas dos modelos de referência possuem os mesmos padrões de uso, ou seja, os mesmos *schedules*, utilizados na simulação do MOD-REAL.

Os modelos de referência contêm os mesmos valores de potência dos equipamentos e os mesmos valores de calor dissipado pelas pessoas.

Os sistemas de iluminação, no entanto, possuem a densidade de potência de iluminação (DPI) condizente com o nível de eficiência energética para cada modelo simulado, conforme Tabela 13. Nesse caso, utilizou-se o método da área do edifício, avaliando de forma conjunta todos os ambientes da edificação. Escolheu-se este método, pois a atividade principal é o funcionamento de um escritório e, ademais, o ambiente definido para esta atividade ocupa mais de 30% da área da edificação, conforme parâmetros estabelecidos pelo RTQ-C.

O sistema de condicionamento de ar para os modelos de referência considera a mesma tipologia do modelo real, alterando o COP de acordo com os valores estabelecidos pelo INMETRO (2018) para cada nível de eficiência energética (Tabela 14), como recomenda o RTQ-C. Os COP para o aquecimento foram estabelecidos em 90% do COP de resfriamento, de acordo com o Manual do RTQ-C. Além disso, o sistema também deve utilizar o mesmo termostato e a renovação de ar do MOD-REAL. Os sistemas também foram dimensionados de acordo com os dias de projeto de verão e inverno, delimitando o número máximo de horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar em 10% das horas de funcionamento, segundo o RTQ-C.

As infiltrações nos modelos de referência foram consideradas da mesma forma que no MOD-REAL.

Tabela 13: Densidade de Potência de Iluminação em W/m<sup>2</sup> para os modelos de referência

|                         | A   | B    | C    | D    |
|-------------------------|-----|------|------|------|
| DPI (W/m <sup>2</sup> ) | 9,7 | 11,2 | 12,6 | 14,1 |

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 14: Coeficiente de Desempenho (COP) em W/W para os modelos de referência

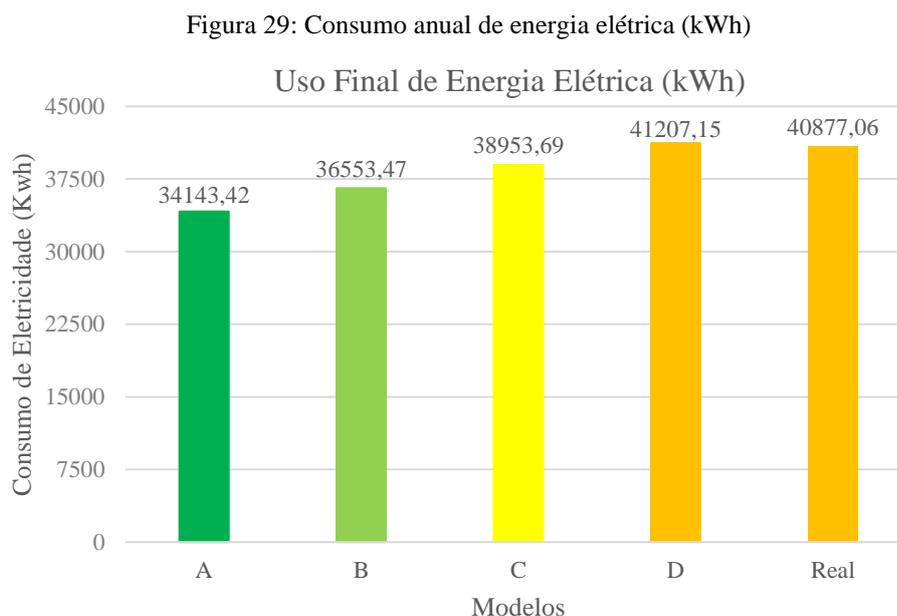
|           | A    | B    | C    | D    |
|-----------|------|------|------|------|
| COP (W/W) | 3,23 | 3,02 | 2,81 | 2,60 |

(fonte: elaborada pelo autor)

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

A determinação do nível de eficiência energética da edificação real, utilizando o método de simulação do RTQ-C, é feita através da comparação do consumo anual de energia elétrica do MOD-REAL com os Modelos de Referência. O objetivo é demonstrar que o consumo de energia da edificação deve ser igual ou menor do que o consumo do edifício de referência, ou seja, para que a edificação seja classificada como nível A, por exemplo, é necessário que o resultado do consumo da simulação do MOD-REAL seja menor ou igual ao resultado da simulação do MOD-REF-A. O método de simulação do RTQ-C permite apenas a classificação da ENCE geral.

Os resultados do consumo anual de energia elétrica das simulações de todos os modelos encontram-se no gráfico da Figura 29.



(fonte: elaborada pelo autor)

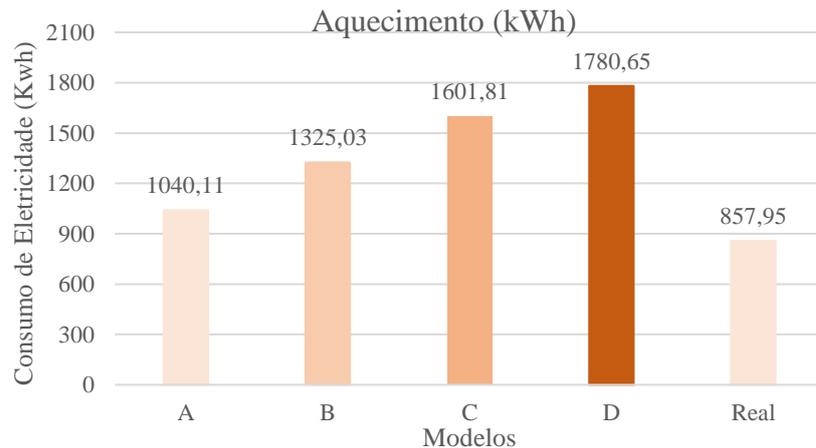
A partir de uma análise do gráfico, foi identificado o aumento do consumo de energia total dos modelos de referência à medida que as suas propriedades foram alteradas, seguindo a metodologia apresentada no item 4 deste trabalho e em consonância com o RTQ-C.

Ao comparar todos os modelos, foi possível enquadrar o MOD-REAL em nível D de eficiência energética. Neste caso, não foi necessário analisar os pré-requisitos gerais para a edificação, pois o RTQ-C prevê o cumprimento destes requisitos apenas para os níveis A, B ou C de eficiência energética. Da mesma forma, os pré-requisitos específicos de iluminação e de

condicionamento de ar também não foram analisados, visto que se aplicam somente para os níveis A, B e C.

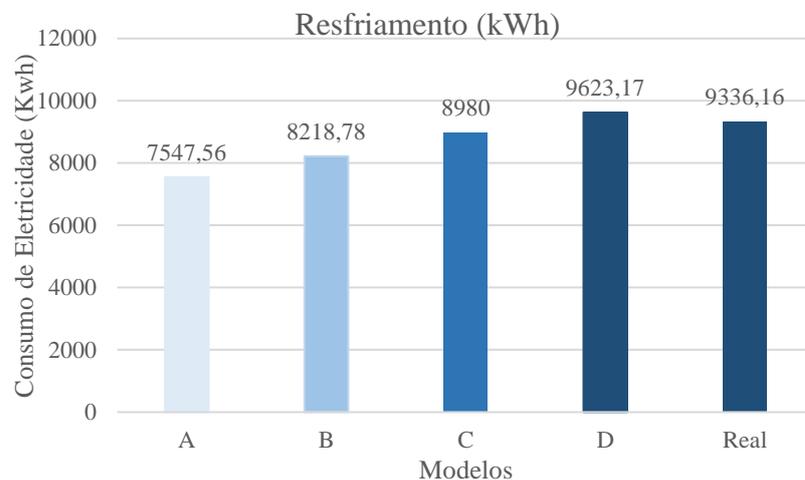
Para melhor entender o comportamento termo energético do MOD-REAL, optou-se por analisar separadamente os consumos anuais de energia elétrica para aquecimento (Figura 30) e resfriamento (Figura 31).

Figura 30: Consumo anual de energia elétrica para aquecimento em kWh



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 31: Consumo anual de energia elétrica para resfriamento em kWh



(fonte: elaborada pelo autor)

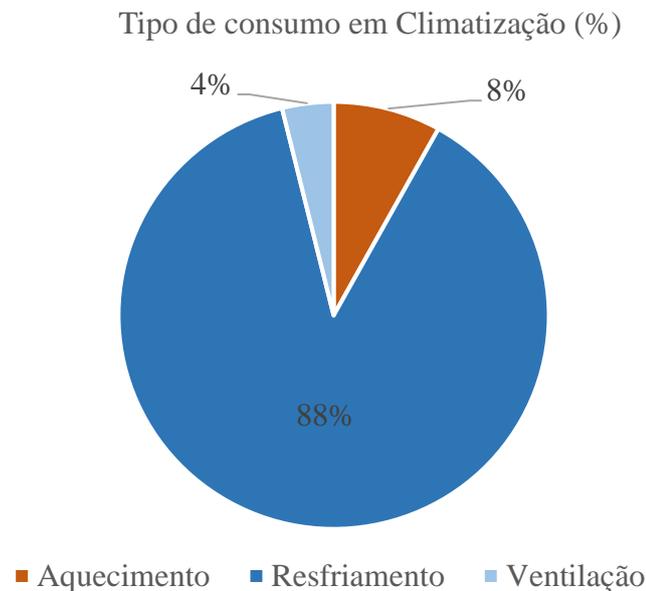
Os modelos de referência apresentam em todas as figuras um crescimento do consumo de energia, do nível A ao nível D, como o esperado.

A partir de uma análise dos gráficos das Figuras 30 e 31, percebe-se que o MOD-REAL se comporta de maneira mais eficiente nos períodos de inverno, em comparação aos modelos de referência. Essa diferença no consumo de energia elétrica para aquecimento entre o MOD-

REAL e os modelos de referência ocorre devido a alguns fatores, tais como propriedades térmicas dos materiais e elementos construtivos e cargas térmicas internas. A absorvância à radiação solar e a transmitância térmica da envoltória e o fator solar dos vidros do MOD-REAL apresentam valores inferiores aos do MOD-REF-A. Somado a isso, as cargas térmicas internas geradas pelo sistema de iluminação são superiores às dos modelos de referência, devido à DPI ser maior no MOD-REAL. Dessa forma, é possível identificar que o MOD-REAL, além de ter uma carga térmica interna superior, consegue armazenar por mais tempo a temperatura devido isolamento térmico da sua envoltória.

Por outro lado, quando se analisa o desempenho termo energético da edificação em períodos mais quentes do ano, o consumo de energia elétrica para resfriamento do MOD-REAL é superior aos consumos dos modelos REF-A, REF-B e REF-C. Assim, percebe-se que o isolamento térmico da envoltória é prejudicial para essa edificação no verão. Ademais, a grande área envidraçada da fachada oeste e a ausência de sombreamento nas aberturas da Sala do Escritório potencializam os ganhos térmicos nos ambientes voltados à oeste e conseqüentemente o aumento da necessidade de climatização. Essas análises podem ser corroboradas através da Figura 32, que contém as porcentagens da divisão de consumo de climatização anual.

Figura 32: Divisão do Consumo anual de Climatização em aquecimento, resfriamento e ventilação

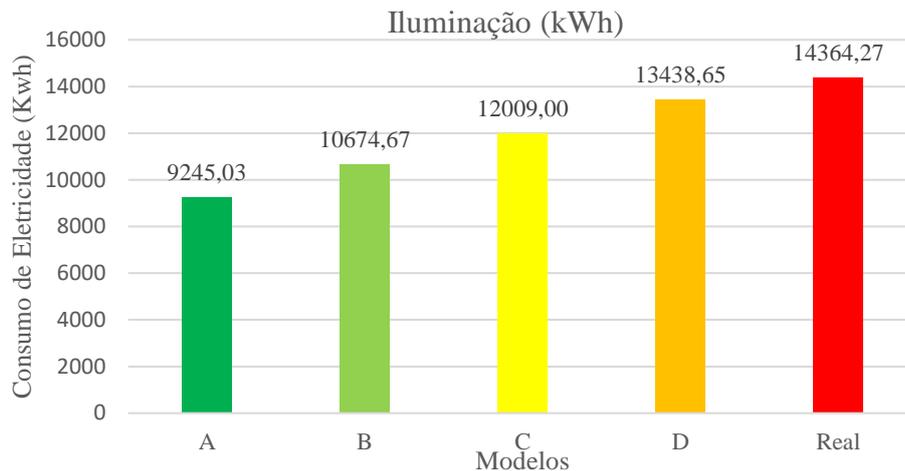


(fonte: elaborada pelo autor)

Os sistemas de iluminação dos modelos também foram analisados separadamente. A Figura 33 apresenta uma comparação do consumo anual de energia elétrica em kWh dos

modelos de referência e do MOD-REAL para a iluminação do escritório. No que tange o sistema da edificação existente, é possível identificar a ineficiência do sistema instalado, sendo a DPI igual a 15,7 W/m<sup>2</sup>, cerca de 11% a mais que do que o recomendado pelo RTQ-C para o nível E.

Figura 33: Consumo anual de energia elétrica do Sistema de Iluminação em kWh



(fonte: elaborada pelo autor)

Para determinar quais zonas térmicas possuem os piores níveis de eficiência energética para os sistemas de iluminação, fez-se uma avaliação independente dos ambientes. Os resultados da auditoria estão representados na Tabela 15, na coluna DPI, de acordo com as cores de cada nível de eficiência energética.

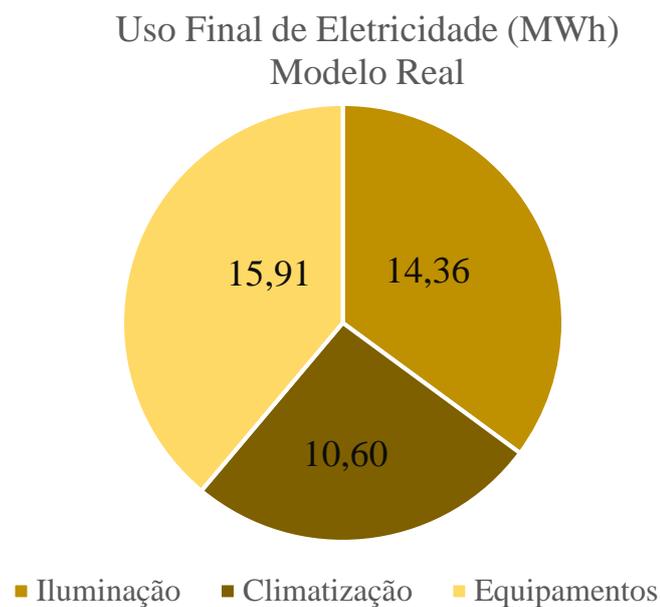
Tabela 15: DPI em W/m<sup>2</sup> por zona térmica

|    | Zona                    | Área (m <sup>2</sup> ) | Potência dissipada Total (W) | DPI (W/m <sup>2</sup> ) |
|----|-------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1  | Sala do Escritório      | 136,69                 | 1901                         | 13,91                   |
| 2  | Recepção                | 137,74                 | 2150                         | 15,61                   |
| 3  | Sala Comercial          | 18,05                  | 212                          | 11,75                   |
| 4  | Sala Rede               | 11,91                  | 128                          | 10,75                   |
| 5  | Sala de Reuniões        | 15,19                  | 324                          | 21,33                   |
| 6  | WC Feminino             | 2,79                   | 80                           | 28,67                   |
| 7  | WC Masculino            | 2,9                    | 80                           | 27,59                   |
| 8  | Cozinha                 | 13,04                  | 128                          | 9,82                    |
| 9  | WC Masculino -Vestiário | 3,51                   | 150                          | 42,74                   |
| 10 | WC PNE                  | 3,7                    | 40                           | 10,81                   |
| 11 | Depósito                | 3,57                   | 40                           | 11,20                   |
| 12 | WC Feminino -Vestiário  | 3,24                   | 150                          | 46,30                   |
| 13 | Circulação              | 3,78                   | 200                          | 52,91                   |

(fonte: elaborada pelo autor)

O consumo de energia elétrica da edificação existente de acordo com o uso final está representado na Figura 34. Analisando-se do maior uso final ao menor, temos um consumo representativo dos equipamentos e do sistema de iluminação. Por tratar-se de um escritório, há um número considerável de computadores e notebooks sendo utilizados com um monitor adicional. Somado a isso, na Sala Rede encontram-se toda a infraestrutura computacional que garante o funcionamento da rede.

Figura 34: Consumo de energia elétrica em MWh por uso final



(fonte: elaborada pelo autor)

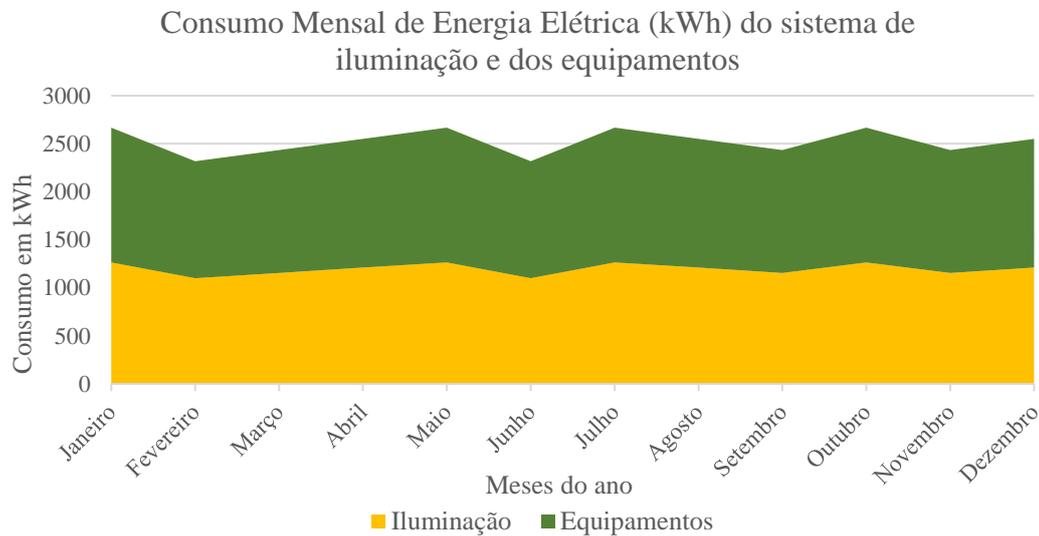
Como comentado anteriormente, o sistema de iluminação é ineficiente, ou seja, consome muita energia elétrica para iluminar um escritório. Uma possível justificativa é a defasagem do sistema instalado, com lâmpadas ineficientes e antigas. Outro provável motivo é a inexistência de um projeto luminotécnico anterior à execução das instalações elétricas, resultando em um sistema superdimensionado.

Por tratar-se de uma edificação com envelope em *light steel* frame, o desempenho termo energético apresenta uma performance mais adequada para climas temperados e frios. Sendo assim, para a Zona Bioclimática 3, essa envoltória não possui um desempenho adequado para os meses mais quentes, necessitando de sistemas de condicionamento de ar para garantia de uma temperatura dentro da faixa de conforto térmico.

Por fim, realizando uma análise do consumo mensal de energia elétrica para o MOD-REAL, percebe-se que o consumo dos equipamentos e do sistema de iluminação é relativamente

constante, apresentando alterações apenas nos meses de dias úteis diferentes, conforme gráfico apresentado na Figura 35.

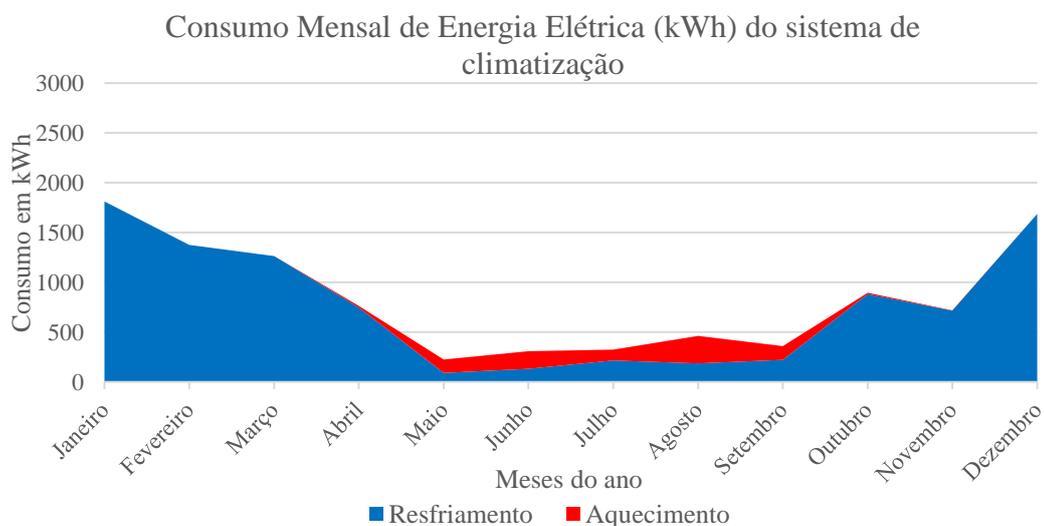
Figura 35: Consumo mensal de Energia Elétrica em kWh para os sistemas de iluminação e equipamentos



(fonte: elaborada pelo autor)

Com relação ao consumo de energia elétrica para climatização (Figura 36), é nítido o maior consumo do sistema de resfriamento nos meses mais quentes – de dezembro a março – e de menor consumo do final do outono ao início da primavera. Por outro lado, o consumo de energia para o aquecimento é quase inexistente ao longo de todo o ano, apresentando um crescimento nos meses mais frios de inverno.

Figura 36: Consumo mensal de energia elétrica em kWh para climatização



(fonte: elaborada pelo autor)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem como objetivo trazer as considerações finais a respeito do presente trabalho e propor algumas linhas de pesquisas futuras.

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ramo da Construção Civil no Brasil ainda está atrelado a métodos construtivos que não fornecem um desempenho energético satisfatório para os seus produtos. As normas NBR 15575 e NBR 15220 surgiram da necessidade de melhorar o desempenho dessas edificações, enquanto os Requisitos Técnicos de Qualidade (RTQ-C e RTQ-R) surgiram para avaliar e classificar as edificações quanto o seu consumo de energia elétrica.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar o consumo de energia elétrica de uma edificação de serviço construída para operar como plantão de vendas e utilizada como escritório. Além disso, visou-se a classificação energética da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. Embora tenham sido feitas algumas simplificações do modelo construtivo e dos sistemas da edificação, obteve-se o nível D da ENCE para o escritório, com um consumo anual de energia elétrica 20% maior do que o MOD-REF-A.

Para que a edificação seja etiquetada com esse nível de eficiência, o Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações prevê que um Organismo de Inspeção Acreditado (OIA) faça a inspeção da edificação de acordo com o RAC, corroborando ou não, o projeto e análise desenvolvido para a edificação.

Ao avaliar a edificação existente, observou-se comportamentos distintos para os meses de verão e de inverno. A envoltória em *steel frame* somada à baixa transmitância térmica e absorvância térmica da cobertura propiciam que a edificação tenha um desempenho satisfatório nos períodos inverniais. Seu envelope isolado mantém as temperaturas internas, dispensando a necessidade de aquecimento do ar durante grande parte dos dias frios de Porto Alegre. Quando comparada ao MOD-REF-A, proposto pelo RTQ-C, observa-se que o MOD-REAL consome menos energia elétrica para aquecimento.

Por outro lado, nos meses mais quentes, o consumo de energia elétrica para resfriamento aproxima-se do MOD-REF D, ou seja, apresenta um desempenho energético insatisfatório. Esse desempenho deve-se, principalmente, ao isolamento da envoltória e aos aportes térmicos

proporcionados pelas grandes aberturas à oeste, que influenciam a preservação da temperatura interna elevada nas duas maiores zonas térmicas da edificação. Além disso, essas aberturas propiciam o desenvolvimento do chamado efeito estufa dentro desses ambientes.

Durante o período de visitas à edificação, realizou-se algumas entrevistas com os usuários. Constatou-se que, durante o inverno, o sistema de climatização é ligado durante poucas horas, principalmente nos primeiros horários da manhã. No verão, em contrapartida, apurou-se que, na grande maioria dos dias quentes, o sistema de climatização permanece ligado durante toda a jornada de trabalho. Essas informações vão ao encontro dos resultados simulados e apresentados no item 5 deste trabalho.

Quanto ao sistema de iluminação, foi possível identificar o superdimensionamento do sistema operante no escritório. A DPI da edificação, igual a  $15,7 \text{ W/m}^2$ , ultrapassa o nível E estabelecido pelo RTQ-C ( $14,1 \text{ W/m}^2$ ). Dessa forma, constata-se a falta de um projeto luminotécnico para a edificação e a ineficiência das lâmpadas empregadas. Essa elevada densidade de potência de iluminação, além de gerar um maior consumo de energia elétrica, proporciona um aumento das cargas internas da edificação, agravando ainda mais o quadro energético no verão.

Para melhorar o nível de eficiência desta edificação, sugere-se uma requalificação do ambiente construído. Para tal, priorizam-se estratégias passivas que venham a diminuir ainda mais o consumo de energia elétrica. Como métodos passivos, propõe-se a melhora do sombreamento das aberturas envidraçadas, através de brises verticais reguláveis na fachada oeste que aproveitem a luz solar nos períodos matinais e barrem a entradas da radiação nos períodos vespertinos; a requalificação do sistema de iluminação, desenvolvendo um projeto luminotécnico eficiente e pautado na utilização de sistemas independentes próximos às aberturas, com controle automatizado de acionamento, interagindo melhor com a entrada de luz; e a utilização de ventilação noturna nos meses de verão, para diminuir a temperatura interna dos ambientes.

É possível também realizar alterações mais robustas, como a requalificação da envoltória. Sugere-se a substituição dos vidros por vidros de melhor desempenho térmico e com fatores solares mais baixos e a utilização de materiais que aportem uma inércia térmica maior ao envelope da edificação.

Percebeu-se também, ao longo do desenvolvimento desse trabalho, a complexidade dos métodos de simulação do RTQ-C. Para classificar corretamente a edificação, há a necessidade

de desenvolver outras quatro edificações de referência e modelá-las. Esse procedimento pode causar a não adesão do mercado e o desinteresse das empresas para utilizar este método de certificação. Em todo o Brasil, desde 2009, 135 ENCEs Projeto foram obtidas para edificações comerciais, de serviço ou públicas, e apenas 4 em 2019. Dessas 4, somente uma foi realizada através do método de simulação.

## 6.2 SUGESTÕES DE PESQUISA

Levando-se em conta o tema do trabalho, é interessante que se desenvolvam outros estudos com a finalidade de aprofundar e aumentar o conhecimento nessa área. Desta forma, sugerem-se três linhas de pesquisa, dando prosseguimento a este trabalho e descritas nos itens 6.2.1, 6.2.2 e 6.2.3.

### 6.2.1 Desempenho termo energético de edificações comerciais, de serviço e públicas

- a) Análise do desempenho térmico da edificação, propondo a utilização de áreas ventiladas de longa permanência visando a diminuição do consumo de energia elétrica para climatização;
- b) Análise do desempenho termo energético de edificações em *steel frame* nas Zonas Bioclimáticas brasileiras;
- c) Estudo dos impactos térmicos e energéticos no desempenho de edificações leves associadas às soluções passivas em climas quentes.

### 6.2.2 Estudo do conforto térmico em edificações comerciais, de serviço e públicas

- a) Análise do conforto térmico adaptativo em edificações ventiladas naturalmente em diferentes Zonas Bioclimáticas;
- b) Estudo do comportamento de utilização dos sistemas de condicionamento de ar pelo usuário;

### 6.2.3 Revisão da metodologia aplicada pelo RTQ-C e RTQ-R para analisar o desempenho energético de edificações

- a) Estudo comparativo de metodologias, *benchmarks* e certificações internacionais;
- b) Desenvolvimento de *benchmarks* para avaliação de desempenho energético de edificações comerciais, de serviço e públicas;

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações – Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações – Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

AMECKE, H. The impact of energy performance certificates: A survey of German home owners. *Energy policy*, v. 46, p. 4-14, 2012.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.

BAVARESCO, V. M.; GHISI, E. Métodos de avaliação de eficiência energética por consumo global e energia primária. p. 135, 2016.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução-RE Nº 09 DE 16 DE JANEIRO Publicada no DOU nº14, de 20 de janeiro de 2003**. Disponível em: <[http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE\\_09\\_2003\\_1.pdf/629ee4fe-177e-4a78-8709-533f78742798?version=1.0](http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_1.pdf/629ee4fe-177e-4a78-8709-533f78742798?version=1.0)>. Acesso em: 5 dez. 2019.

CAROTENUTO, A. R. D. S. Análise do desempenho termoenergético de um prédio histórico de elevada inércia térmica. p. 251, 2009.

DIAS, A. DA S. **Avaliação do desempenho térmico de coberturas metálicas utilizadas em edificações estruturadas em aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil, 2011.

ELETROBRAS/PROCEL. Manual para Aplicação do RTQ-C. p. 213, 2016.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional)**. Disponível em: <[http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-\(nacional\)](http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-(nacional))>. Acesso em: 24 ago. 2019.

EnergyPlus, 2019a. “**EnergyPlus Documentation – Engineering Reference**”, Version 2.2., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

\_\_\_\_\_. **Auxiliary Programs**: the encyclopedic reference to EnergyPlus, 2019b.

\_\_\_\_\_. **Input Output Reference**: the encyclopedic reference to EnergyPlu, 2019c.

FERNANDES, L. O. **A influência do sombreamento do entorno na etiqueta de eficiência energética de edifício comercial**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas, 2012.

GOULART, S.; LAMBERTS, R. **LEVANTAMENTO DA EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL Experiência nos Estados Unidos**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2004-2008/aet-3>>. Acesso em: 7 dez. 2019.

HEYWOOD, H. **101 Reglas Básicas para una Arquitectura de Bajo Consumo Energético**. 1. ed. Londres: Editorial Gustavo Gili, 2017.

INMETRO. RTQ-C. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas Com alterações das portarias: nº17 de 2012 e nº299 de 2013**, p. 96, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO. RTQ-R. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**, p. 136, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO. **Eficiência Energética - Condicionadores De Ar Split Hi-Wall Com Rotação Fixa**. n. 30, p. 29, 2018.

KINSEL, L. S. **Avaliação do Conforto e da Energia em Edifícios Residenciais de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

- LAMBERTS, R. et al. **Análise de Arquivos Bioclimáticos para a Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios\\_pesquisa/Relatorio\\_AnaliseArquivosClimaticos\\_Labeee.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Relatorio_AnaliseArquivosClimaticos_Labeee.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Florianópolis: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.
- MELO, A. P.; WESTPHAL, F. S.; MATOS, M. **Apostila do curso básico do Programa EnergyPlus**. Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/telefones>>.
- MENDES, N. et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 47–68, 2005.
- MORELLO, A. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO PROTÓTIPO HABITACIONAL ALVORADA**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- OLIVEIRA, L. K. DOS S. et al. Simulação Computacional Da Eficiência Energética Para Uma Arquitetura Sustentável. **Holos**, v. 4, p. 217, 2016.
- OMER, A. M. Energy, Environment and Sustainable Development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2265–2300, 2008.
- ORDENES, M. et al. Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDOE-3.1. **UFSC. Florianópolis, ...**, p. 1–19, 2003.
- RODRIGUES, C.; BENINCÁ, L.; DE ARAÚJO, E. Eficiência Energética nas Edificações: Programa Brasileiro de Etiquetagem-Procet Edifica. **V Seminário Internacional de Construções Sustentáveis**, n. 1, 2016.
- SAINT GOBAIN GLASS. **Manual do Vidro**. 1. ed. Santa Iria de Azoia: Saint Gobain Glass, 2000.
- SERAFIN, R. M. Avaliação da redução do consumo de energia elétrica em função do retrofit no edifício sede da Eletrosul. p. 139, 2010.

SILVA, H. DA C.; KINSEL, L. S. Região Climática de Porto Alegre - revisão para um desenho inteligente e uma arquitetura adequada. **Arqtexto**, v. 9, p. 124–133, 2006.

SIQUEIRA, T. C. P. A. et al. Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 2, p. 133–138, 2005.

WEBER, M. E. **Eficiência Energética e Conforto Térmico na Requalificação do Patrimônio Arquitetônico de Imigração Alemã no Rio Grande do Sul: Estudo de Caso do Salão Holler**. Trabalho de Diplomação—[s.l.] Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

## **APÊNDICE A – CÁLCULOS DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS**

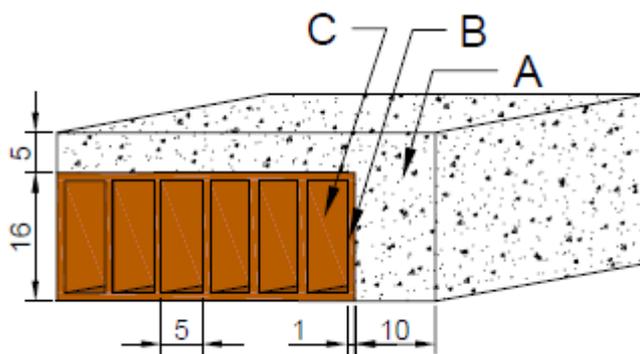
*Cálculos das propriedades térmicas dos elementos construtivos que compõe a envoltória da edificação real*

a) PISO

O piso do escritório é constituído de um sistema de lajes pré-moldadas de vigotas tavelas e capa de concreto, ilustrado pela Figura A.1. As tabelas possuem as dimensões 16x37x20 cm e estão espaçadas por vigotas de 10 cm.

A determinação das propriedades térmicas de um elemento construtivo equivalente para o piso foi realizada de acordo com a metodologia de (ORDENES et al., 2003).

Figura A.1: Representação da seção do elemento construtivo piso



Assim, busca-se encontrar um modelo equivalente cujas propriedades térmicas sejam semelhantes ao modelo real. Para tal, é necessário encontrar as resistências e capacidades térmicas de cada camada do modelo real e a total, cujos cálculos encontram-se a seguir. A Tabela A.1 e a Tabela A.2 apresentam, respectivamente, as propriedades necessárias para encontrar as resistências térmicas e as capacidades térmicas de cada camada.

Tabela A.1: Propriedades dos materiais constituintes do piso para o cálculo da resistência térmica

| Material | Condutividade Térmica (W/m.K) | Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .K/W) |
|----------|-------------------------------|---|
| Ar       | -                             | 0.21                                      |
| Cerâmica | 0.9                           | -   |
| Concreto | 1.75                          | -   |

Tabela A.2: Propriedades dos materiais constituintes do piso para o cálculo da capacidade térmica

| Material | Calor específico (kJ/kg.K) | Densidade de Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|----------------------------|--|
| Cerâmica | 0,92                       | 1500   |
| Concreto | 1                          | 2300   |

### Cálculo da resistência térmica das camadas

#### Camada A

Área da Camada A:

$$A_C = 0,1 * 0,20 = 0,020 \text{ m}^2$$

Resistência Térmica da Camada A:

$$R_A = \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}}$$

$$R_A = \frac{0,21}{1,75} = 0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

#### Camada B

Área da Camada B:

$$A_B = 0,01 * 0,20 = 0,002 \text{ m}^2$$

Resistência Térmica da Camada B:

$$R_B = \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}}$$

$$R_B = \frac{0,16}{0,9} + \frac{0,05}{1,75} = 0,206 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

#### Camada C

Área da Camada C:

$$A_C = 0,05 * 0,20 = 0,010 \text{ m}^2$$

Resistência Térmica da Camada C:

$$R_C = \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}}$$

$$R_C = \frac{0,01}{0,9} + 0,21 + \frac{0,01}{0,9} + \frac{0,05}{1,75} = 0,261 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

**Resistência térmica das camadas**

Considerando uma tavela de 37cm e uma vigota de 10cm:

$$R_p = \frac{A_A + 7A_B + 6A_C}{\frac{A_A}{R_A} + \frac{7A_B}{R_B} + \frac{6A_C}{R_C}}$$

$$R_p = \frac{0,020 + 7 * 0,002 + 6 * 0,010}{\frac{0,020}{0,120} + \frac{7 * 0,002}{0,206} + \frac{6 * 0,010}{0,261}} = 0,202 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Resistência térmica total**

$$R_T = R_{SE} + R_p + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + 0,202 + 0,17 = 0,412 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da capacidade térmica das camadas**

$$C_T = \sum(e * c * \rho)$$

**Camada A**

$$C_{T_A} = (0,21 * 1 * 2300) = 483 \frac{kJ}{m^2 \cdot K}$$

**Camada B**

$$C_{T_B} = (0,16 * 0,92 * 1500) + (0,05 * 1 * 2300) = 335,8 \frac{kJ}{m^2 \cdot K}$$

**Camada C**

$$C_{T_C} = (0,05 * 1 * 2300) + (0,02 * 0,92 * 1500) = 142,6 \frac{kJ}{m^2 \cdot K}$$

**Cálculo da capacidade térmica do elemento piso**

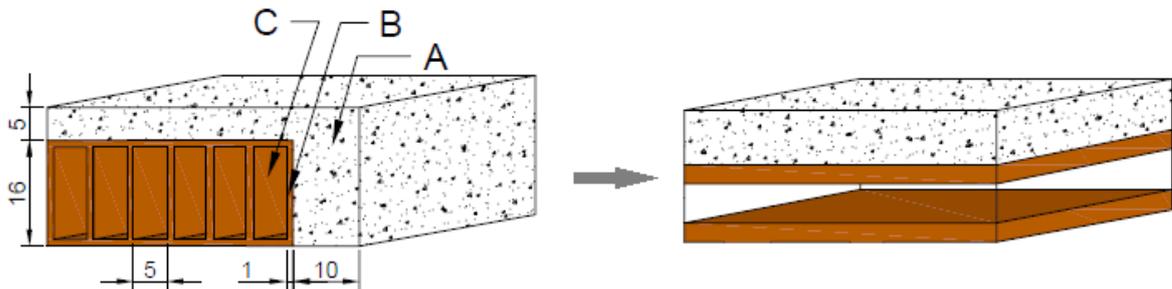
$$C_T = \frac{A_A + 7A_B + 6A_C}{\frac{A_A}{C_{T_A}} + \frac{7A_B}{C_{T_B}} + \frac{6A_C}{C_{T_C}}}$$

$$C_T = \frac{0,020 + 7 * 0,002 + 6 * 0,010}{\frac{0,020}{483} + \frac{7 * 0,002}{335,8} + \frac{6 * 0,010}{142,6}} = 186,561 \frac{kJ}{m^2 \cdot K}$$

### Determinação do modelo equivalente

Tendo as propriedades térmicas do elemento construtivo real, busca-se encontrar um modelo equivalente, cujas camadas são divididas igualmente ao longo de toda a seção, conforme Figura A.2.

Figura A.2: Modelo Equivalente para o piso



Para a determinação de uma espessura equivalente ( $e_{eq}$ ), considerou-se a resistência térmica total ( $RT_{eq}$ ) do modelo equivalente igual a resistência térmica total do modelo de referência ( $RT_{módulo}$ ).

$$RT_{equi} = 2 \cdot \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} = 0,412 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$0,412 = 2 \cdot \frac{e_{cerâmica}}{0,9} + 0,21 + \frac{0,21}{1,75}$$

$$e_{cerâmica} = 0,0369m$$

Para complementar o procedimento, a densidade de massa aparente equivalente da cerâmica para este elemento é calculada mantendo a capacidade térmica do componente, que neste caso é de 186,561 kJ/m<sup>2</sup> K.

$$C_T = \sum(e * c * \rho)$$

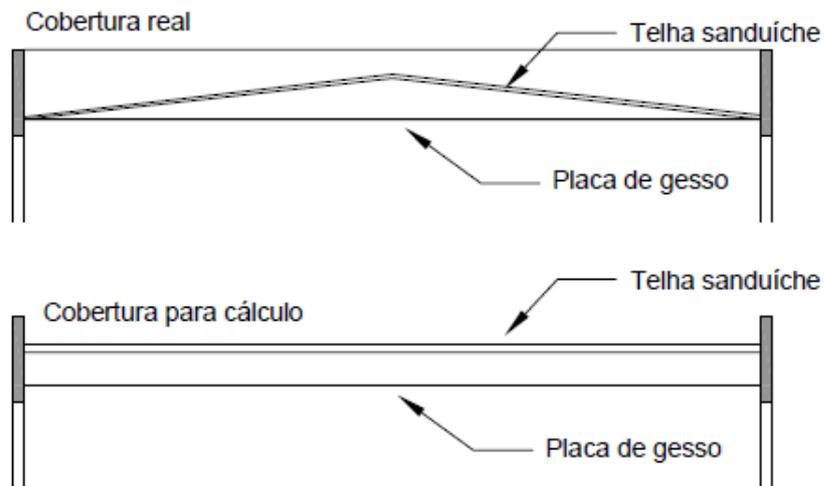
$$C_T = (2 * 0,0369 * 0,9 * \rho) + (0,05 * 1 * 2300) = 186,561$$

$$\rho = 1077,4(\text{kg/m}^3)$$

## b) COBERTURA

As propriedades termo físicas da cobertura foram inseridas no *EnergyPlus* considerando uma cobertura equivalente, conforme Figura A.3. Essa metodologia foi utilizada segundo a NBR 15220-2.

Figura A.3: Cobertura real x Cobertura para cálculo e seus componentes



*Cálculos das Transmitâncias Térmicas dos elementos construtivos do Modelo Real*

A, A\* - PAREDE EXTERNA:

**Cálculo da Resistência Térmica:**

$$R_T = R_{SE} + \frac{e_{camada}}{\lambda_{camada}} + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + \frac{0,0125}{0,35} + 0,17 + \frac{0,0125}{0,35} + 0,13 = 0,411 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = 2,433 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

B - PAREDE INTERNA STD:

**Cálculo da Resistência Térmica:**

$$R_T = R_{SE} + \frac{e_{camada}}{\lambda_{camada}} + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + \frac{0,0125}{0,35} + 0,17 + \frac{0,0125}{0,35} + 0,13 = 0,411 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = 2,433 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

C - PAREDE INTERNA ACÚSTICA:

**Cálculo da Resistência Térmica:**

$$R_T = R_{SE} + \frac{e_{camada}}{\lambda_{camada}} + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + \frac{0,0125}{0,35} + \frac{0,095}{0,045} + \frac{0,0125}{0,35} + 0,13 = 2,35 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,425 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

D - PAREDE FIBROCIMENTO:

**Cálculo da Resistência Térmica:**

$$R_T = R_{SE} + \frac{e_{camada}}{\lambda_{camada}} + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + \frac{0,01}{0,65} + 0,17 + \frac{0,01}{0,65} + 0,13 = 0,37 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = 2,697 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

E - PAREDE IMPERMEABILIZADA:

**Cálculo da Resistência Térmica:**

$$R_T = R_{SE} + \frac{e_{camada}}{\lambda_{camada}} + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + \frac{0,003}{0,23} + \frac{0,0125}{0,35} + 0,17 + \frac{0,0125}{0,35} + 0,13 = 0,424 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = 2,356 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

F - PISO:

**Cálculo da Resistência Térmica:**

$$R_T = R_{SE} + \frac{e_{camada}}{\lambda_{camada}} + R_{SI}$$

Adotando o valor obtido na seção anterior:

$$R_T = 0,04 + 0,202 + 0,17 = 0,412 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = 2,427 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

G - COBERTURA:

**Cálculo da Resistência Térmica:**

$$R_T = R_{SE} + \frac{e_{camada}}{\lambda_{camada}} + R_{SI}$$

$$R_T = 0,04 + \frac{0,005}{55} + \frac{0,03}{0,04} + \frac{0,005}{55} + 0,21 + \frac{0,02}{0,35} + 0,17 = 1,227 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

**Cálculo da Transmitância Térmica:**

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,815 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

**APÊNDICE B – CÁLCULOS DO INDICADOR DE CONSUMO DA  
ENVOLTÓRIA E DA PORCENTAGEM DE ABERTURA DAS FACHADAS**

*Cálculo do Indicador de Consumo da envoltória ( $IC_{env}$ ) do modelo para a Zona Bioclimática 3*

$$\begin{aligned}
 IC_{env} = & -170,30 \times FA - 212,79 \times FF + 21,86 \times PAF_T + 5,59 \times FS - 0,19 \times AVS \\
 & + 0,15 \times AHS + 275,19 \times \frac{FA}{FF} + 213,35 \times FA \times FF - 0,45 \times PAF_T \times AHS \\
 & + 190,42
 \end{aligned}$$

Sendo:

FA: Fator Altura

FF: Fator de Forma

PAF<sub>T</sub>: Percentual de Abertura na Fachada Total

FS: Fator Solar

AVS: Ângulo Vertical de Sombreamento

AHS: Ângulo Horizontal de Sombreamento

Os cálculos e os valores de cada componente da equação do  $IC_{env}$  serão apresentados a seguir.

$$FA = \frac{A_{pcob}}{A_{total}} = 1$$

Sendo:

$A_{pcob}$  = Área de projeção da cobertura

$A_{total}$  = Área total construída

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{total}} = \frac{682,86}{987,20} = 0,69$$

Sendo:

$A_{env}$  = Área de envoltória

$V_{total}$  = Volume da edificação

Para o Cálculo do Percentual de Abertura da Fachada total (Tabela B.1), considera-se um valor médio representativo do percentual de aberturas de todas as fachadas. Deve-se realizar o cálculo do PAF para a fachada oeste (PAF<sub>O</sub>) e em seguida o PAF<sub>T</sub>. Se o PAF<sub>O</sub> for 20% maior que o PAF<sub>T</sub>, deve-se adotar o valor de PAF<sub>O</sub> na equação do  $IC_{env}$ .

Tabela B.1: Cálculo do PAF

| Fachada               | Propriedades        |                  |                  |      |
|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|------|
|                       | A (m <sup>2</sup> ) | PAF <sub>o</sub> | PAF <sub>t</sub> | PAF  |
| Área de Fachada Total | 326.99              | 0.865219         | 0.3723           | 0.87 |
| Área de Vidro Total   | 121.75              |                  |                  |      |
| Área de Fachada Oeste | 103.78              |                  |                  |      |
| Área de Vidro Oeste   | 89.79               |                  |                  |      |

Nesse caso, o PAF<sub>o</sub> supera os 20% permitidos e dessa forma o valor adotado par ao PAF da edificação é o do PAF<sub>o</sub>.

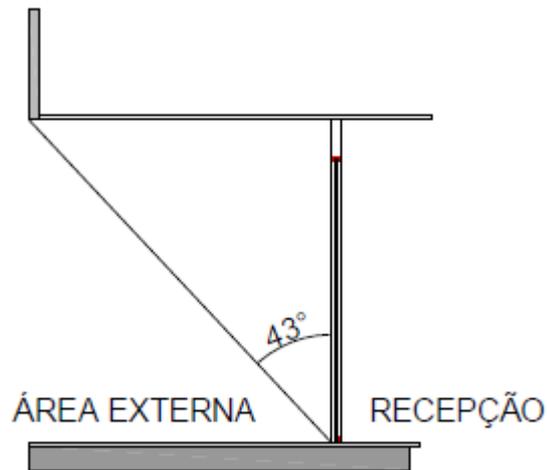
Os vidros da edificação são laminados, de espessura 10mm e FS = 0,75 (SAINT GOBAIN GLASS, 2000, p. 562).

Para o cálculo dos ângulos de sombreamento (AVS e AHS) é necessário analisar a influência em todas as esquadrias. O AVS é a relação entre as aberturas e os seus ângulos de sombreamento e a somatória das áreas de abertura. Na edificação, o sombreamento vertical está presente nas janelas de vidro da fachada oeste da sala do escritório (Figura B.1) e na porta janela da fachada leste da recepção (Figura B.2).

Figura B.1: AVS na janela da sala do escritório - fachada oeste



Figura B.2: AVS na porta janela da recepção - fachada leste



O AHS é calculado da mesma maneira, com a exceção de que para cada abertura deve ser calculada a média dos ângulos encontrados, um para cada lateral da abertura. Na edificação, existe sombreamento horizontal em todas as aberturas das fachadas leste (Figuras B.3, B.4 e B.5) e oeste (Figuras B.6 e B.7) e na porta de entrada na fachada norte (Figura B. 8).

Figura B.3: AHS na janela da cozinha/WCs - fachada leste

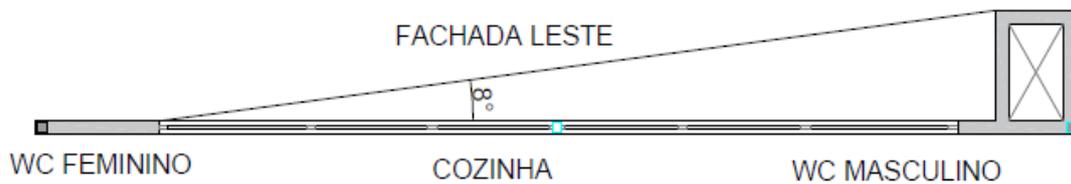


Figura B.4: AHS na porta janela da recepção - fachada leste

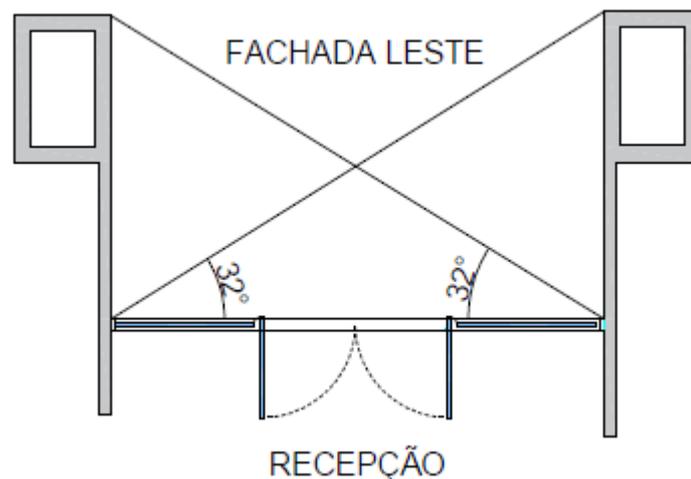


Figura B.5: AHS na janela da sala comercial - fachada leste

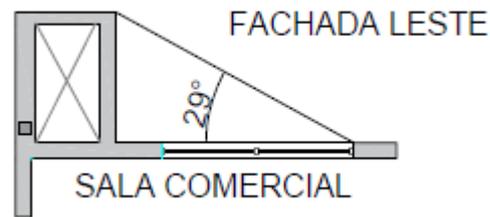


Figura B.6: AHS na janela da recepção – fachada oeste

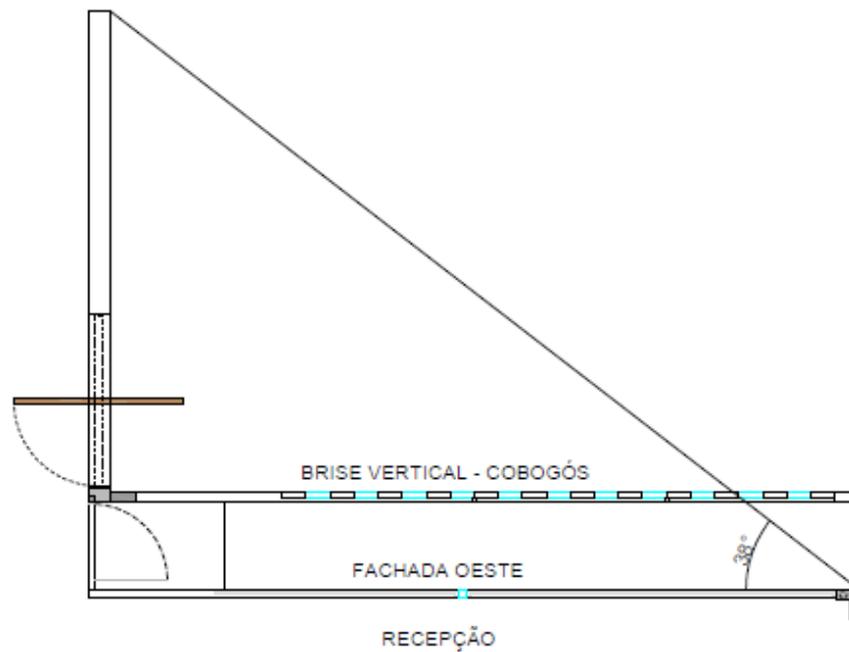


Figura B.7: AHS na janela da sala do escritório – fachada oeste



Figura B. 8: AHS na porta de entrada – fachada norte



Os cálculos dos ângulos de sombreamento vertical e horizontal encontram-se na Tabela B.2. O valor do AVS da edificação é 13,27° e do AHS é 13,88°.

Tabela B.2: Cálculo do AVH e do AVS

| Fachada                  | Abertura                  | Propriedades             |          |          |              |              |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------|----------|--------------|--------------|
|                          |                           | Avidro (m <sup>2</sup> ) | Ângulo H | Ângulo V | AVS          | AVH          |
| Fachada Oeste            | Janela sala do escritório | 63.88                    | 9        | 17       | 12.09        | 11.89        |
|                          | Janela da recepção        | 25.91                    | 19       | 0        |              |              |
| Fachada Norte            | Porta de entrada          | 3.12                     | 45       | 0        | 0.00         | 13.91        |
|                          | Porta Lateral             | 4.76                     | 0        | 0        |              |              |
|                          | Porta Depósito            | 2.21                     | 0        | 0        |              |              |
| Fachada Leste            | Cozinha/WCs               | 4.79                     | 4        | 0        | 24.22        | 22.06        |
|                          | Porta Janela              | 12.32                    | 32       | 43       |              |              |
|                          | Janela da sala comercial  | 4.76                     | 14.5     | 0        |              |              |
| Atotal (m <sup>2</sup> ) |                           | 121.75                   |          |          | <b>13.27</b> | <b>13.88</b> |

Substituindo os valores encontrados na equação do Índice de Consumo da Envoltória, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 IC_{env} = & -170,30 \times 1 - 212,79 \times 0,69 + 21,86 \times 0,87 + 5,59 \times 0,75 - 0,19 \times 13,27 \\
 & + 0,15 \times 13,88 + 275,19 \times \frac{1}{0,69} + 213,35 \times 1 \times 0,69 \\
 & - 0,45 \times 0,87 \times 13,88 + 190,42 = 430,2619
 \end{aligned}$$

Assim, o  $IC_{env}$  da edificação real é 430,26. Para determinar os Índices de Consumo dos modelos de referência, é necessário primeiramente encontrar o limite máximo para esta volumetria,  $IC_{máxD}$ , e o limite mínimo,  $IC_{mín}$ , através da mesma equação, com os parâmetros de entrada definidos na Tabela B.3, extraídos do RTQ-C.

Tabela B.3: Parâmetros para o cálculo do  $IC_{máxD}$  e do  $IC_{mín}$ 

| Parâmetros do $IC_{máxD}$ |      |     |     | Parâmetros do $IC_{mín}$ |      |     |     |
|---------------------------|------|-----|-----|--------------------------|------|-----|-----|
| PAF <sub>T</sub>          | FS   | AVS | AHS | PAF <sub>T</sub>         | FS   | AVS | AHS |
| 0.6                       | 0.61 | 0   | 0   | 0.05                     | 0.87 | 0   | 0   |

Os valores obtidos para o  $IC_{máxD}$  e o  $IC_{mín}$  foram, respectivamente, 429,87 e 419,30. Para encontrar os limites máximos e mínimos para cada um dos níveis de eficiência energética, é necessário encontrar o intervalo  $i$ .

$$i = \frac{IC_{máxD} - IC_{mín}}{4} = \frac{429,87 - 419,30}{4} = 2,6424$$

Substituindo o valor de  $i$  encontrado na Tabela B.4, é possível obter os limites de cada nível de eficiência, representados na Tabela B.5.

Tabela B.4: Equações para determinar os limites de  $IC_{env}$  de cada nível de eficiência

| Eficiência | A                | B                       | C                       | D                      | E                  |
|------------|------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| Lim Mín    | -                | $IC_{máxD} - 3i + 0.01$ | $IC_{máxD} - 2i + 0.01$ | $IC_{máxD} - i + 0.01$ | $IC_{máxD} + 0.01$ |
| Lim Máx    | $IC_{máxD} - 3i$ | $IC_{máxD} - 2i$        | $IC_{máxD} - i$         | $IC_{máxD}$            | -                  |

Tabela B.5: Limites de  $IC_{env}$  para todos os níveis de eficiência

| Eficiência | A      | B      | C      | D      | E      |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lim Mín    | -      | 421.95 | 424.60 | 427.24 | 429.88 |
| Lim Máx    | 421.94 | 424.59 | 427.23 | 429.87 | -      |

#### *Cálculo do $PAF_T$ dos Modelos de Referência*

Para encontrar os valores de  $PAF_T$  dos quatro modelos de referência, substitui-se o  $IC_{env}$  pelo  $IC_{máx}$  de cada nível na equação do  $IC_{env}$ . Os valores de AHS e de AVS são substituídos por 0, de FA e de FF são mantidos os mesmos do modelo real e o FS utilizado para os vidros deve ser igual a 0,87, segundo recomendação do Manual do RTQ-C.

$PAF_T$

$$= \frac{-(-170,30 \times FA - 212,79 \times FF + 5,59 \times FS + 275,19 \times \frac{FA}{FF} + 213,35 \times FA \times FF + 190,42 - IC_{máx})}{21,86}$$

Os valores encontrados para o  $PAF_T$  de cada nível encontram-se na Tabela B. 6.

Tabela B. 6:  $PAF_T$  dos modelos de referência

|         | A      | B      | C      | D      |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| $PAF_T$ | 0.1709 | 0.2918 | 0.4126 | 0.5335 |

**APÊNDICE C – SCHEDULES**

Neste apêndice estão representados de forma gráfica os *schedules* de ocupação e iluminação para as Zonas Térmicas não condicionadas. É importante frisar que a ZT-4 (rede), ZT-11 (depósito) e ZT-13 (circulação) não possuem *schedules* de ocupação, devido ao caráter transitório ou escasso das pessoas nos ambientes.

### **Schedules de Ocupação para as zonas não condicionadas**

Figura C.1 : *Schedule* de Ocupação - Banheiros

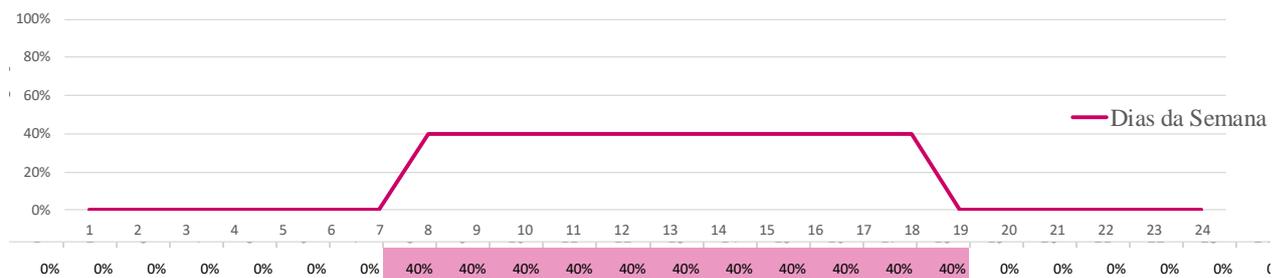
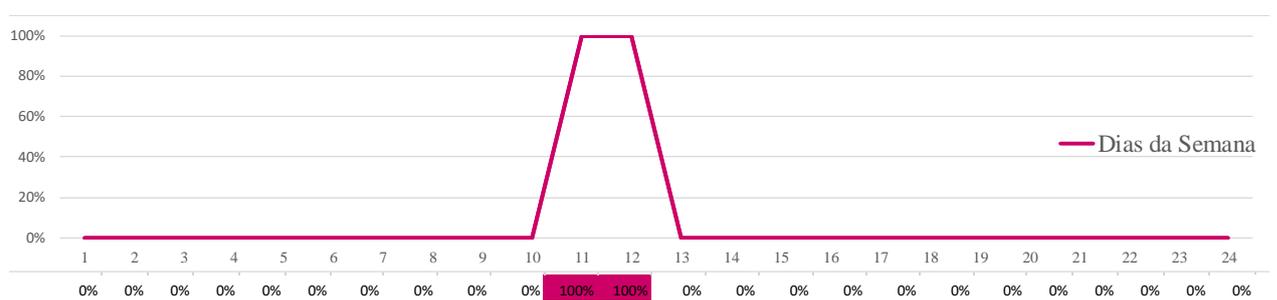
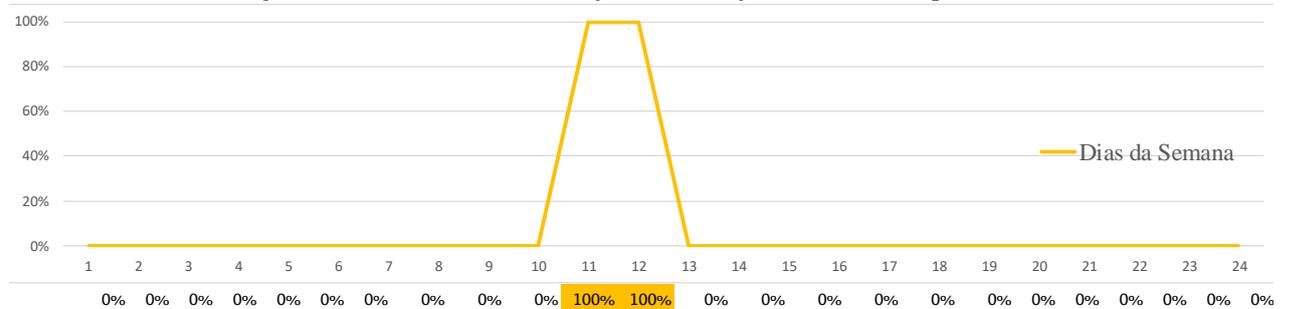


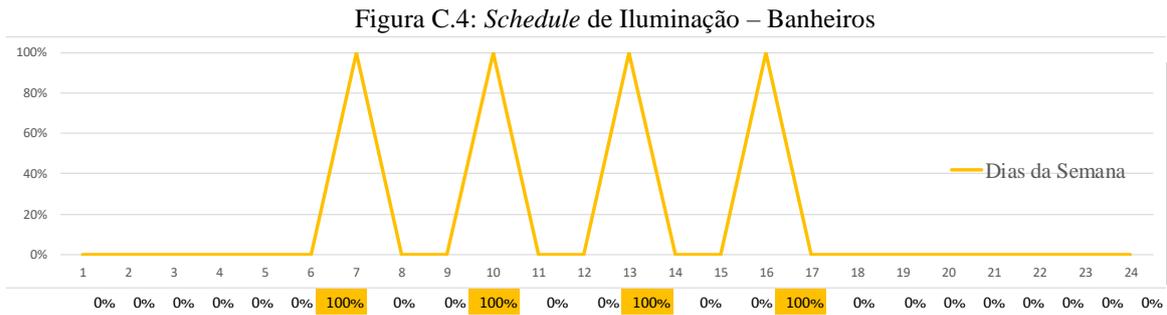
Figura C.2: *Schedule* de Ocupação - Cozinha



### **Schedules de Iluminação para as zonas não condicionadas**

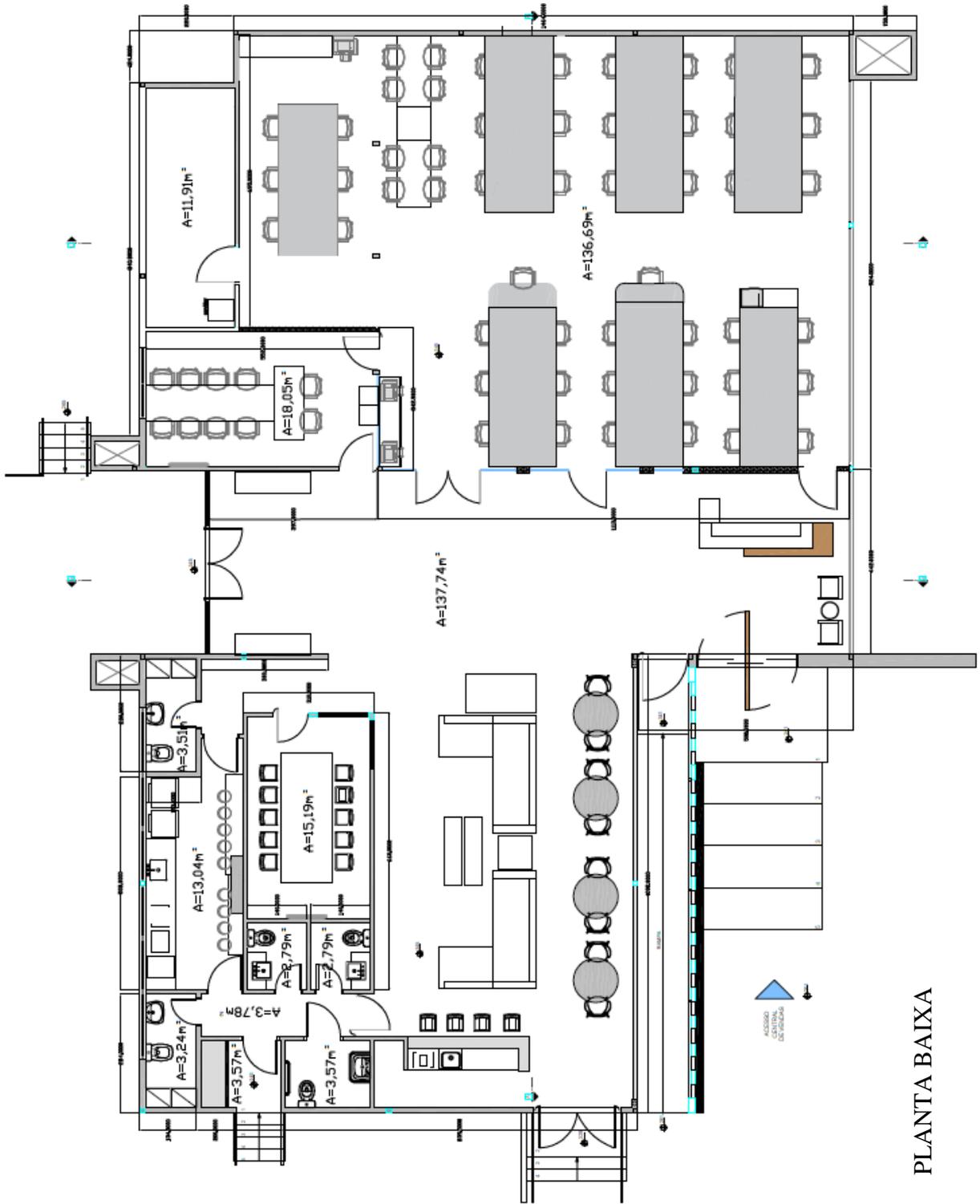
Figura C. 3: *Schedule* de Iluminação – Circulação, Cozinha e Depósito





Os *schedules* dos banheiros foram definidos desta forma para representar o número de horas que os sistemas de iluminação estão funcionando na edificação real.

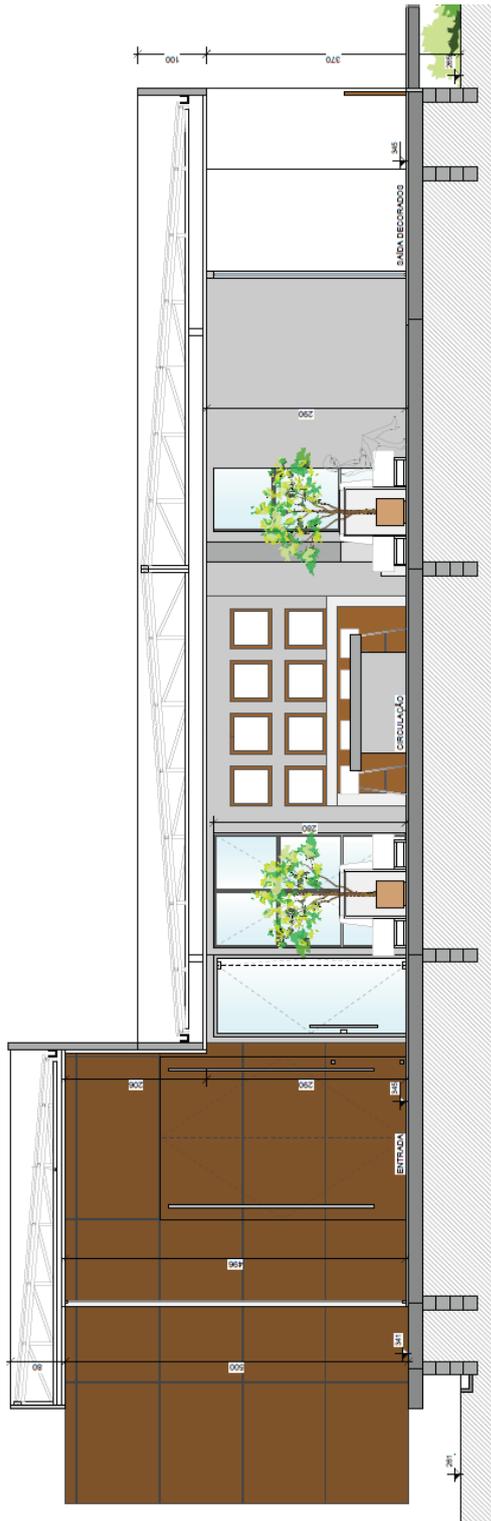
## **ANEXO A – Planta Baixa do Escritório**



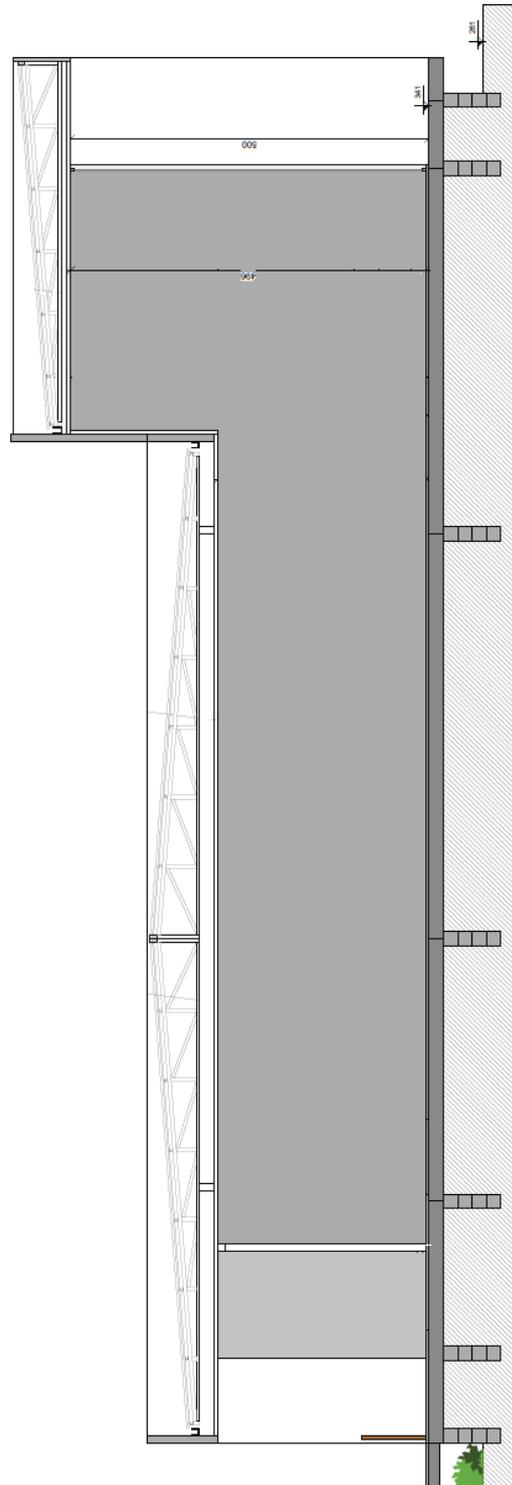
PLANTA BAIXA

## **ANEXO B – Cortes A, B e C do Escritório**



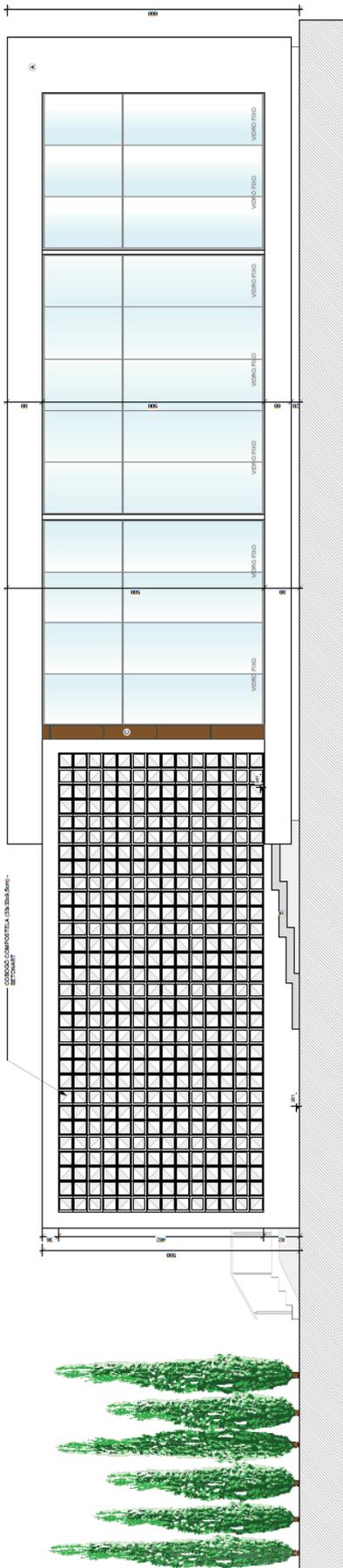


CORTE B

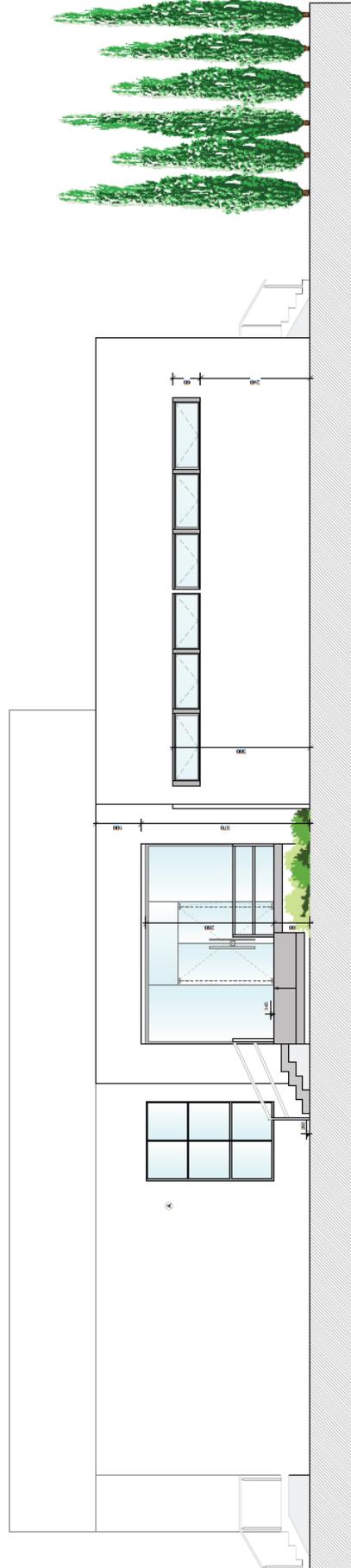


CORTE C

**ANEXO C – Fachadas do Escritório**



FACHADA OESTE



FACHADA LESTE

