

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO PARA EVENTOS EM PALMITINHO E
COMPARATIVO ENTRE CONDICIONAMENTO DE AR E MÉTODOS PASSIVOS DE
CLIMATIZAÇÃO

por

Caliel Bruno Pedon

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

PEDON, CALIEL BRUNO, 1996 -
ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO
PARA EVENTOS EM PALMITINHO E COMPARATIVO
ENTRE CONDICIONAMENTO DE AR E MÉTODOS
PASSIVOS DE CLIMATIZAÇÃO / CALIEL BRUNO PEDON.
2021

23 f.

Orientador: PROF^a DRA. LETÍCIA JENISCH RODRIGUES
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(GRADUAÇÃO) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL, ESCOLA DE ENGENHARIA, CURSO DE
ENGENHARIA MECÂNICA, PORTO ALEGRE, RS-BR, 2021.

Caliel Bruno Pedon

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO PARA EVENTOS EM PALMITINHO
E COMPARATIVO ENTRE CONDICIONAMENTO DE AR E MÉTODOS PASSIVOS DE
CLIMATIZAÇÃO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof^ª. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, dezembro de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO PARA EVENTOS EM
PALMITINHO E COMPARATIVO ENTRE CONDICIONAMENTO DE AR E
MÉTODOS PASSIVOS DE CLIMATIZAÇÃO

Pedon, Caliel Bruno

caliel.pedon@hotmail.com

Resumo. *Com a crescente demanda na matriz energética brasileira, busca-se continuamente por inovações e melhorias no aproveitamento energético para climatização das edificações. Estas representam aproximadamente 30% do consumo energético brasileiro e, ao longo dos anos, a aplicação de painéis solares e sistema solar de aquecimento de água vêm ganhando espaço no mercado para amenizar este fato. Porém, a redução de consumo sempre deve ser considerada como uma solução para estes casos, visto que possuem maior facilidade de instalação, logística e menor custo. Com base nesta premissa, desenvolve-se um estudo para análise energética em uma edificação para a cidade de Palmitinho/RS onde a construção da edificação e a simulação energética são realizadas pelo software SketchUp e EnergyPlus, respectivamente. Este estudo visa avaliar qual a temperatura operativa de cada zona térmica durante o ano e o consumo de energia elétrica total, mostrando quais os equipamentos mais influenciadores. Após, é realizada a implementação de métodos passivos de climatização para fazer o contraponto ao sistema de climatização artificial já existente e reduzindo o seu uso. Esta análise reflete em temperaturas equivalentes entre a climatização artificial e por métodos passivos, assim como redução do uso de energia elétrica em até 20%, conferindo eficácia dos métodos aplicados.*

Palavras-chave: *Análise energética, condicionamento de ar, alternativas passivas, Energy Plus.*

Energy analysis of a building for events in Palmitinho and comparison between air conditioning and passive climate methods

Abstract. On the increasing demand for Brazilian energy, there is a continuous search for innovations and improvements in air conditioning energy for buildings. Their consumption represents close to 30% total Brazilian energy consumption and, over the years, the application of solar panels and a solar water heating system has been gaining ground in the market to alleviate this fact. However, reducing consumption should always be considered a solution for these cases, as they have greater ease of installation, logistics and lower cost. Based on this premise, this study developed an energy analysis in a building for the city of Palmitinho/RS, where the building construction and energy simulation are carried out by SketchUp and EnergyPlus software, respectively. This study aims to assess the operating temperature of each thermal zone during the year and the total electrical energy consumption, showing which equipment is the most influencing. Then, passive air conditioning methods are implemented to counterbalance the artificial air conditioning system and making it useless. This analysis reflects on equivalent temperatures between artificial air conditioning and passive methods, as well as a reduction in the use of electricity by up to 20%, ensuring the effectiveness of the applied methods.

Keywords: Energy analysis, air conditioning, passive alternatives, Energy Plus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à minha família pelos anos de apoio estudantil prestados desde o tempo de ensino fundamental até o final de todo o período da graduação. À minha avó paterna, tios(as) e aos meus avós maternos, que infelizmente hoje já não se encontram mais aqui.

Agradeço também aos amigos e companheiros que fiz durante o curso de Engenharia Mecânica e que, compartilharam os momentos de estudo, angústia e felicidade.

Ao arquiteto Thiago Henrique Pedon, meu primo, pela disponibilização do projeto arquitetônico para que este trabalho pudesse ser realizado.

Agradecimentos à Escola de Engenharia e aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelos recursos disponibilizados, ensinamentos e conselhos acadêmicos e profissionais que, certamente, levarei comigo para o resto da vida.

Também gostaria de agradecer, em especial, à Professora Dra. Letícia Jenisch Rodrigues pela orientação fornecida neste trabalho de conclusão de curso. Pela forma como foi apresentada a disciplina de Transferência de Calor e Massa e, posteriormente, Análise de Energia em Edificações. Estas foram as disciplinas que me instigaram a estudar mais e seguir na área de Energia e Fenômenos e Transporte.

Por fim, agradeço aos orientadores, supervisores e chefes que tive durante todo o período acadêmico e de estágio. Têm uma contribuição significativa nesta conquista.

NOMENCLATURA

Símbolos

e	Espessura de uma camada homogênea	[m]
ΔT	Diferença de temperaturas entre os ambientes	[K]
U	Transmitância térmica de componentes	[W/m K]
c	Calor específico	[kJ/kg°C]
CT	Capacidade térmica	[kJ/m ² .K]
T_{op}	Temperatura Operativa	[°C]
A	Constante em função do ar	[adim]
T_a	Temperatura do ar ambiente	[°C]
T_{rm}	Temperatura média radiante	[°C]
va	Velocidade do ar	[m/s]
RT	Resistência térmica total	[W/m°C]
R_{se}	Resistência térmica da superfície externa	[W/m°C]
R_{si}	Resistência térmica da superfície interna	[W/m°C]
Rk	Resistência térmica das camadas intermediárias	[W/m°C]
q''	Fluxo de calor em uma superfície	[W/m ²]
U	Transmitância térmica	[m°C/W]
C	Consumo energético	[kWh]
Pop	Potência operativa média	[W]
t	tempo	[h]

Símbolos gregos

λ	Condutividade térmica de um material	[W/m K]
α	Absortância à radiação solar da superfície	[adim]
ρ	Densidade do material	[W/m K]
ε	Emissividade hemisférica	[adim]
Σ	Somatório	[adim]

Abreviaturas e acrônimos

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
VRF	Variable Refrigerant Flow
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
NBR	Norma Brasileira
CCAE	Consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar
CgT	Carga térmica total anual da edificação
SPLV	Eficiência energética do sistema de condicionamento de ar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Temperatura Operativa.....	10
2.2 Taxa metabólica	11
2.3 Resistência Térmica e Transmitância Térmica	12
2.4 Consumo energético do sistema de climatização artificial	12
3. METODOLOGIA	13
3.1 Climatologia.....	14
3.2 Construção da Edificação.....	14
3.3 Materiais de construção.....	14
3.4 Taxa de ocupação e taxa metabólica	15
3.5 Iluminação e equipamentos elétricos	15
3.6 Condicionamento de ar.....	16
3.7 Simulação do comportamento térmico energético da edificação.....	16
4. RESULTADOS.....	16
4.1 Análise de temperatura da região	16
4.2 Temperatura Operativa da Edificação.....	17
4.3 Consumo energético.....	18
4.4 Aplicação de métodos passivos de climatização.....	19
4.4.1 Telhado Verde	20
4.4.2 Brises horizontais	20
4.4.3 Ventilação natural	21
4.5 Temperatura operativa para soluções passivas.....	21
4.6 Análise de consumo energético com soluções passivas.....	22
5. CONCLUSÃO	24
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
7. APÊNDICES.....	26
8. ANEXOS.....	29

1. INTRODUÇÃO

O aumento do consumo energético no Brasil vem ocasionando crises no setor de eletricidade que se tornam cada vez mais comuns. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética brasileira (EPE, 2021), o consumo de energia elétrica por residências vem aumentando com o passar dos anos e, com base nisto, diversas soluções estão sendo criadas para conter este problema, seja gerando a própria eletricidade com painéis solares, aprimorando outras fontes de energia como a eólica ou reduzindo o consumo com soluções passivas.

Segundo o Balanço Energético Nacional (2017), no Brasil, as edificações são responsáveis por 30% do consumo de energia na sociedade. Os sistemas de climatização, seguidos pela iluminação artificial são os maiores consumidores de energia elétrica nos edifícios comerciais, consumindo até 70% desta energia conforme dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2021). Desta forma, tem-se uma necessidade a curto e médio prazo de redução do consumo com enfoque em edificações residenciais e comerciais de centros urbanos, pois é onde reside a maior parte da população (Junior, 2015).

Junior (2015), também avalia as soluções bioclimáticas como telhado verde e ventilação natural como métodos eficazes de climatização de residências, visto que a umidificação e o e as trocas térmicas permitem que a edificação se mantenha em conforto térmico independentemente do sistema de condicionamento de ar.

Como solução para este problema, Rodrigues (2015) define as estratégias bem-sucedidas que desempenham papel de solução passiva de climatização, como maior quantidade de aberturas, sombreamento, ventilação natural, adoção de materiais construtivos de propriedades térmicas mais correlatas. Porém, para estas definições deve-se ser realizado todo o balanço térmico da edificação a fim determinar as melhores medidas a serem aplicadas.

De acordo com Pozza (2011), a alteração do sistema de ar condicionado *Split* com ciclo reverso presente em uma edificação, o qual representava 42% do consumo total de energia elétrica, por um sistema de ventilação natural causou redução significativa no consumo energético da edificação, realizando simulações com o *EnergyPlus*. Com base nisto, as simulações neste software se mostram de suma importância para realização de projetos e simulações térmicas.

Seguindo a análise de redução de consumo energética, ao aplicar métodos passivos de climatização como películas e alteração da espessura dos vidros da edificação e pintura das paredes, Caus (2019) conseguiu obter uma redução isolada de 5% no gasto de energia elétrica e, quando combinados, os métodos aplicados podem reduzir em até 30% esse consumo.

Neste trabalho desenvolveu-se um estudo para análise energética em uma edificação para a cidade de Palmitinho/RS. O estudo de caso permite avaliar alternativas de para a redução do consumo energético da edificação e fazer um comparativo entre os casos de condicionamento artificial de ar e de soluções passivas de conforto térmico do ambiente em questão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Temperatura Operativa

De acordo com Lamberts Et. Al. (2016), a Temperatura Operativa, ou *Top*, pode ser descrita como Temperatura uniforme de um ambiente com comportamento de corpo negro imaginário, no qual o ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme. Basicamente corresponde à um valor médio entre a Temperatura de Bulbo Seco (TBS) do ar ambiente e a temperatura média radiante deste

mesmo recinto. O cálculo desta temperatura pode ser realizado conforme a Equação (1), em função da velocidade do ar.

$$T_{op} = A.Ta + (1 - A).T_{rm} \quad (1)$$

Sendo que:

T_{op} = Temperatura Operativa

A = Constante estimada em função da velocidade do ar

T_a = Temperatura do ar ambiente

T_{rm} = Temperatura média radiante

Os valores da variável A podem ser determinados conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Determinação de A em função da velocidade do ar. Fonte: Lamberts Et. Al., 2016

A	Velocidade do ar (va)
0,5	< 0,2 m/s
0,6	0,2 até 0,6 m/s
0,7	0,6 até 1,0 m/s

2.2 Taxa metabólica

É o processo de conversão de glicose em energia movimentação e funcionamento do nosso organismo. Porém, assim como os demais processos que envolvem transformação de energia, boa parte é convertida em calor (cerca de 80%) que, no caso do metabolismo, é dissipado pela superfície do corpo (Lamberts Et. Al., 2016). A taxa metabólica depende da atividade que o ser humano exerce, sendo uma taxa maior para atividades de maior movimentação (como corrida e exercícios físicos) e menor para atividades de menor movimentação (como repouso ou leitura). A Tabela 1 apresenta dados relativos ao calor dissipado pelo corpo em função da atividade do indivíduo. A taxa metabólica pode ser expressa em W/m² de pele ou em *Met*, unidade do metabolismo cujo valor unitário corresponde a uma pessoa relaxada. Assim, 1 *Met* = 58,15W/m² de área de superfície corporal. A Tabela 2 apresenta algumas atividades expressas em *Met*.

Tabela 2: Taxa metabólica para diferentes atividades. Fonte: Lamberts Et. Al., 2016.

Atividade	Metabolismo [W/m²]	Metabolismo [Met]
Deitado, reclinado	46	0,8
Sentado, relaxado	58	1,0
Atividade sedentária (escritório, escola)	70	1,2
Atividade leve em pé (laboral, fazer compras)	93	1,6
Atividade média em pé (trabalho doméstico, balonista)	116	2,0
Caminhando em local plano a 2 km/h	110	1,9
Caminhando em local plano a 3 km/h	140	2,4
Caminhando em local plano a 4 km/h	165	2,8
Caminhando em local plano a 5 km/h	200	3,4

2.3 Resistência Térmica e Transmitância Térmica

De acordo com Incropera et. al. (2011), a resistência térmica pode ser definida como a razão entre um potencial motriz, ou seja, a diferença de temperaturas, e a correspondente taxa de transferência, a taxa de calor. Já a NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) define resistência térmica de uma camada homogênea, R , como a razão de e por λ . Acrescentando ao conceito estabelecido pela norma, tem-se que resistência térmica de um plano composto por camadas homogêneas e diferentes materiais ortogonais ao fluxo de calor, de superfície a superfície, R_t , é dada pelo somatório das resistências, R_k , de cada camada, juntamente com a resistência térmica da superfície externa, R_{se} , e interna, R_{si} . Assim, a resistência térmica de um componente plano composto por n camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, de ambiente a ambiente, RT , é dada pela Equação (2).

$$RT = R_{se} + R_{si} + \sum_{k=1}^n R_k \quad (2)$$

Incropera (2011) também diz que a Transmitância térmica U é o inverso da resistência térmica, e que pode ser usado para calcular o fluxo de calor em uma superfície, q'' , conforme descrito na Equação (3).

$$q'' = \frac{1}{RT} \Delta T = U \Delta T \quad (3)$$

Estas equações estão presentes na base matemática utilizada para o cálculo de carga térmica realizado no software de simulação *EnergyPlus*. Para que esta simulação ocorra adequadamente, é necessário inserir as propriedades termofísicas de cada material, conforme ilustrado no Anexo II

2.4 Consumo energético do sistema de climatização artificial

De acordo com De Bona (2017), a avaliação do consumo energético do sistema de climatização está diretamente ligada à sua condição de referência $CCAP_{REF}$ e à condição real do sistema $CCAP_{REAL}$. Portanto, o consumo energético de um sistema de climatização para resfriamento é dado pela Equação (4).

$$CCA E = \frac{CgT}{SPLV} \quad (4)$$

Sendo que:

CCA E = Consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar (kWh/ano);

CgT = Carga térmica total anual da edificação (kWh/ano);

SPLV = Eficiência energética do sistema de condicionamento de ar (adimensional)

Já para o aquecimento, o consumo médio do sistema de climatização não se difere dos equipamentos elétricos em geral, sendo esse consumo representado pela Equação (5).

$$C = Pop \cdot t \quad (5)$$

Sendo que:

C = Consumo do equipamento de climatização para aquecimento, em kWh

Pop = Potência operativa média, em W;

t = tempo de uso, em h

Estas informações são de alta relevância para avaliar os impactos que o sistema de climatização causa no consumo energético final da edificação analisada, além de representarem o modelamento matemático do *software* de simulação utilizado.

3. METODOLOGIA

Existem várias formas de se obter condições de conforto térmico em um ambiente. Dentre elas, a solução mais viável em termos ecológicos e até mesmo financeiros é a técnica de soluções passivas. Soluções passivas são aquelas que não possuem condicionamento de ar artificial, utilizando apenas de recursos que inibem a radiação solar, auxiliam na ventilação ou que isolam termicamente o ambiente a fim de se obter o menor consumo energético possível para se alcançar as condições de conforto térmico do ambiente. De acordo com Lamberts Et. Al. (2016), a utilização das estratégias passivas de aquecimento e de resfriamento no projeto proporciona a redução do tempo de utilização de sistemas artificiais para atingir o conforto térmico, conseqüentemente reduz o consumo de energia nas edificações.

Dado essa premissa, o estudo busca fazer uma análise energética de uma edificação comercial e para eventos de um Salão Paroquial, localizado na cidade de Palmitinho/RS. A escolha desta edificação se deu pela disponibilidade do arquiteto projetista (Pedon, 2020) em não restringir o uso do projeto para fins acadêmicos, assim podendo ser divulgados os detalhamentos de planta baixa, equipamentos elétricos e de iluminação e demais detalhes da edificação. Este edifício foi projetado com dois níveis de ocupação, sendo o primeiro andar totalmente comercial e já climatizado, e o segundo andar um espaço grande para eventos. A Figura 1 ilustra o desenho projetado da edificação utilizada no estudo.



Figura 1: Projeto 3D do Salão Paroquial Santa Teresinha - Palmitinho/RS. Fonte: Pedon, 2020.

Pelo fato de já haver climatização artificial no andar inferior, a análise energética foi realizada apenas no andar superior do edifício, considerando o piso que divide estes níveis como uma condição de contorno adiabática.

3.1 Climatologia

Estações meteorológicas localizadas em diversas cidades compilam dados anuais sucessivos referentes às condições climáticas de uma determinada região, levando em conta os dados de incidência de radiação solar e da distribuição de temperatura na região ao longo dos anos. Em ASHRAE (2021), tem-se a plataforma onde são inseridos os dados geográficos da cidade desejada (Latitude, Longitude e Altitude), então o programa nos fornece os dados climáticos necessários para a realização dos cálculos climáticos.

Os dados climáticos da cidade de Palmitinho/RS não estão presentes na plataforma utilizada. Para conter essa ausência de informação, foram utilizados os dados climáticos da cidade de Frederico Westphalen, localizada a aproximadamente 20 km de Palmitinho, com dados geográficos semelhantes. O julgamento dessa escolha se mostrou correto, dado o fato de que ambas as cidades possuem dados climáticos semelhantes.

3.2 Construção da Edificação

A construção da edificação é iniciada a partir da planta baixa do segundo andar da mesma (Anexo I). Com o auxílio do software *Google SketchUp*, é realizada a construção da edificação, declarando suas zonas térmicas. Estas foram classificadas de acordo com o grupo de cômodos a qual pertencem. Vale salientar que todas as zonas térmicas (o que inclui o segundo andar da edificação como um todo) possuem um pé direito de 6,05 m. A Figura 2 mostra a construção da edificação.

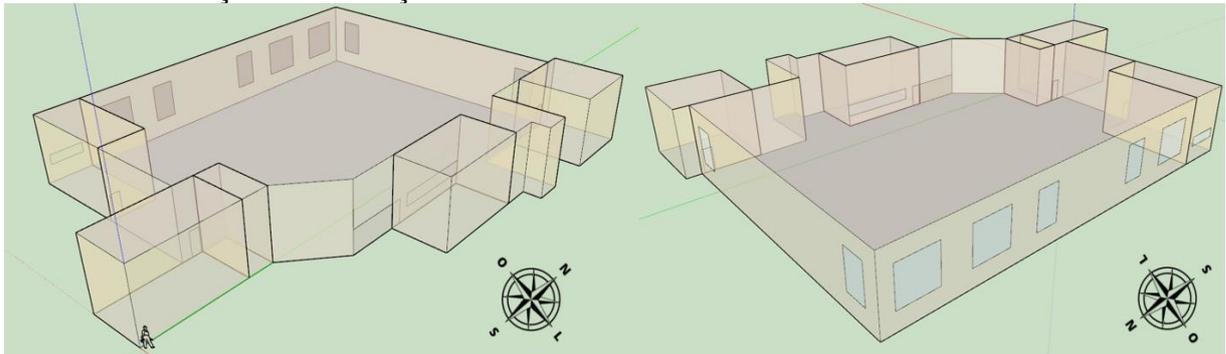


Figura 2: Construção do andar superior da edificação.

Vista isométrica pelo lado sul (esquerda) e lado norte (direita). Fonte: O Autor.

Para a análise térmica da edificação, foram determinadas 06 zonas térmicas de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Zonas térmicas da edificação. Fonte: Pedon, 2020.

#	Zona Térmica	Área (m ²)	Fronteiras
1	Copa	62	Exterior e salão
2	Banheiro Masculino	40,7	Exterior e salão
3	Banheiro Feminino	49	Exterior e salão
4	Escada	12,4	Exterior, banheiro feminino e salão
5	Depósito	49	Exterior e salão
6	Salão	1007	Copa, Banheiros, Escada, Depósito e Salão

3.3 Materiais de construção

A análise energética da edificação depende da declaração de materiais a serem utilizados na construção da mesma. Estes estão classificados em elementos de construção, conforme descritos na Tabela 4. As propriedades físicas e térmicas destes materiais estão descritas no

Anexo II. Para que o *EnergyPlus* possa realizar os cálculos energéticos é necessário inserir estas propriedades dos materiais que compõem os elementos construtivos, como espessura, condutividade térmica, calor específico, absorvidade e densidade. Os valores das propriedades destes materiais foram obtidos das normas NBR 15220-2: 2005 (ABNT, 2005b).

Tabela 4: Lista de materiais de construção utilizados na edificação. Fonte: Pedon, 2020.

Elemento de Construção	Material
Janelas	Vidro simples
Paredes externas	Tijolo de cerâmica com reboco de argamassa
Paredes internas	Tijolo de cerâmica com reboco de argamassa
Portas de acesso	Madeira
Porta de emergência	Aço galvanizado
Forro	Gesso acartonado + câmara de ar (100 cm)
Laje superior e inferior	Concreto armado (20 cm)
Cobertura	Câmara de ar + telha de fibrocimento

3.4 Taxa de ocupação e taxa metabólica

Considerando a divisão das zonas térmicas, definiu-se a taxa de ocupação da edificação. Como este é um ambiente para eventos, as zonas térmicas ocupadas constantemente serão apenas a copa (5 ocupantes) com atividade metabólica que exige movimentação alta constantemente e o salão (100 ocupantes), com taxa metabólica de repouso entre 06h00 e 18h00 e movimentação moderada fora deste horário, conforme o Apêndice I.

De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), para as simulações, esses valores são iguais a 117 W/m² para atividades de repouso, 150 W/m² para movimentação média e 189 W/m² para alta movimentação. Os valores de resistência térmica da vestimenta utilizados nas simulações são calculados pelo *software*, e são quantificados em uma unidade denominada *clo*, onde 1 *clo* = 0,155 m² °C/W. Estes valores de variam conforme a temperatura externa, sendo de 1 *clo* (Temperatura Externa < -5°C) a 0,46 *clo* (Temperatura Externa ≥ 26°C) (NREL, 2021b). A Tabela 5 mostra um resumo das taxas de ocupação e taxas metabólicas declaradas na edificação.

Tabela 5: Taxa de ocupação e taxa metabólica da edificação. Pedon, 2020

Zona Térmica	Copa	Salão
Ocupação	5	100
Taxa metabólica [W/m ²]	189; 150	1171; 150

3.5 Iluminação e equipamentos elétricos

De acordo com Pedon (2020), a iluminação da edificação está definida em 2 lâmpadas tubulares de 40W cada para as zonas térmicas de menor área de piso e 24 lâmpadas de mesma potência para a área do salão. A utilização destes dispositivos pode ser verificada no Apêndice II.

Uma edificação destinada à realização de eventos não possui muitos equipamentos elétricos, porém seus equipamentos possuem um alto consumo de energia elétrica. Neste caso, foi definido como equipamentos elétricos apenas 03 refrigeradores horizontais de 250 W cada e que estão ativos constantemente em sua máxima potência, pois requerem uso contínuo para abastecimento e retirada de produtos.

3.6 Condicionamento de ar

Condicionamento de ar é basicamente o sistema de climatização artificial da edificação, o qual requer uma alta demanda de energia elétrica, podendo ser tanto para resfriamento no verão quanto para aquecimento no inverno. A modelagem de sistemas de condicionamento de ar no *EnergyPlus* é uma tarefa trabalhosa e bem complexa. Por isso, em cada nova versão do programa os desenvolvedores buscam maneiras de simplificar e facilitar esta etapa da modelagem, conforme WESTPHAL (2017). Para isso, definiu-se *setpoints* de aquecimento (18°C) e resfriamento (24°C), os quais definem os pontos de acionamento do ar condicionado. A vazão média de ar por pessoa está definida como 33,84 m³/h, conforme as especificações representadas no Apêndice III.

3.7 Simulação do comportamento térmico energético da edificação

Como já relatado ao longo deste trabalho, para realizar a simulação da análise energética deste edifício foi necessário a utilização do software *Energy Plus*. Este, por sua vez, é uma compilação de módulos de programas, que unidos, simulam construções e os sistemas energéticos a elas associados, quando estes são expostos a diferentes condições de operação e condições climáticas.

Inicia-se o processo a partir do arquivo *Minimal IDF*, que é uma base de início do software onde declaramos os diretórios de salvamento das simulações e os arquivos climáticos a serem lidos, faz-se a entrada de dados das zonas térmicas construídas e declaram-se os materiais de construção utilizados. Desta forma, o software toma como base esses dados para os cálculos de carga térmica radiante na edificação para cada hora ao longo dos dias de um ano.

As cargas energéticas e temperaturas que compõem a solução da simulação, são calculadas integrando-se através de métodos de diferenças finitas, como o Método de Euler, a Equação do balanço de energia no ar da zona (NREL, 2021b).

4. RESULTADOS

O procedimento realizado tem como base de referência a identificação do comportamento da temperatura da região. Na sequência é analisado o comportamento da temperatura operativa para cada zona térmica nos solstícios de verão, inverno e equinócio de primavera para, sucessivamente, definir quais métodos de soluções passivas são cabíveis e quanto elas podem reduzir a o consumo energético local. Os dados climatológicos (ASHRAE, 2021) são mensurados ao longo de anos e foram tratados de forma estatística a fim de que sua representatividade alterações mínimas em um certo intervalo amostral.

4.1 Análise de temperatura da região

Tomado como base os dados climatológicos de Frederico Westphalen, conforme citado no Tópico 3.1, consegue-se simular e verificar a distribuição anual de temperatura da região, conforme a Figura 3.

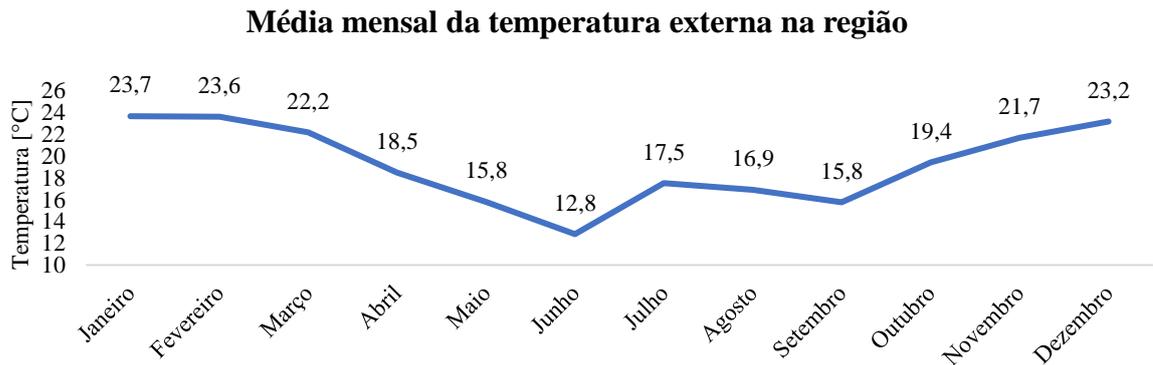


Figura 3: Distribuição de temperatura anual para a cidade de Frederico Westphalen. Fonte: O Autor.

Pode-se verificar que os meses com maiores temperaturas médias são os meses de verão, mais precisamente dezembro e janeiro, com um significativo aumento esporádico de temperatura nos meses de julho e agosto.

Deste modo, é necessário fazer uma análise mais detalhada do comportamento de temperatura em pontos específicos do ano. Foi realizada uma análise da temperatura considerando um intervalo de uma semana, contando a partir dos solstícios de verão e inverno (21/12 e 21/06) e equinócio de primavera (22/09), conforme representado na Figura 4.

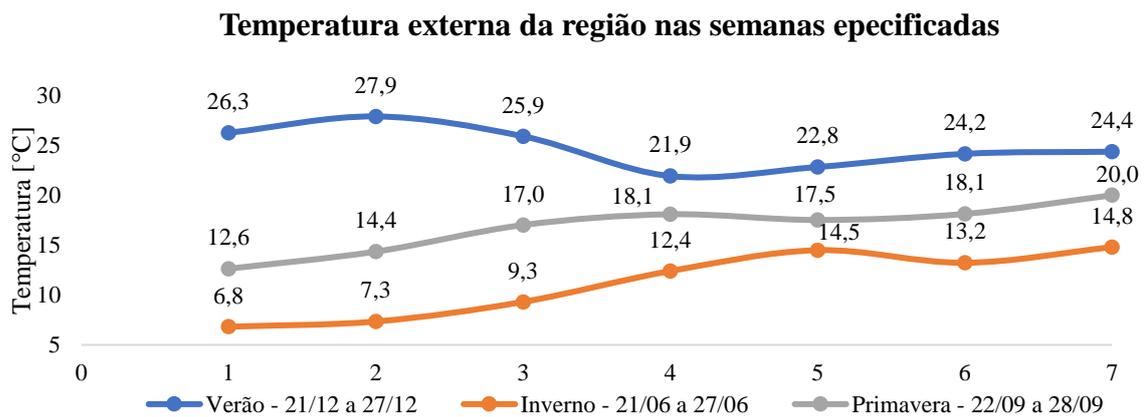


Figura 4: Distribuição de temperatura na cidade de Frederico Westphalen. Fonte: O Autor.

Existe uma diferença esperada entre as temperaturas de diferentes estações do ano. Isto está diretamente ligado ao uso do sistema de climatização, onde há a necessidade de aquecimento das semanas de menor TOP e resfriamento nas semanas de maior TOP

4.2 Temperatura Operativa da Edificação

A fim de avaliar o comportamento térmico interno da edificação, é necessário realizar a simulação sobre a Temperatura Operativa (Top) interna da edificação. Para isto, o software *EnergyPlus* faz uso da Equação (1) quando declarado corretamente suas variáveis. Assim, avaliou-se este parâmetro em cada zona térmica da edificação para as diferentes semanas do ano descritas na Seção 3.1, conforme ilustrado nas Figuras 5, 6 e 7.

Top - Solstício de Verão

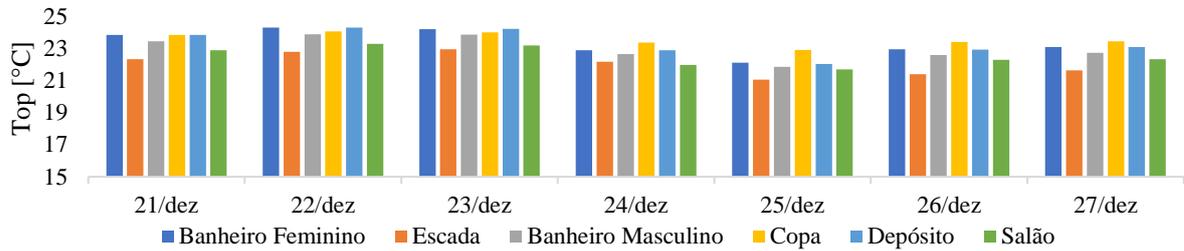


Figura 5: Distribuição de temperaturas no solstício de verão. Fonte: O Autor.

Top - Solstício de Inverno

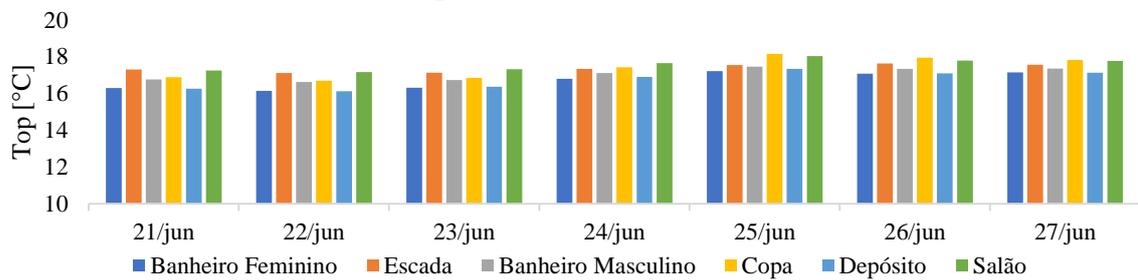


Figura 6: Distribuição de temperaturas no solstício de inverno. Fonte: O Autor.

Top - Equinócio de Primavera

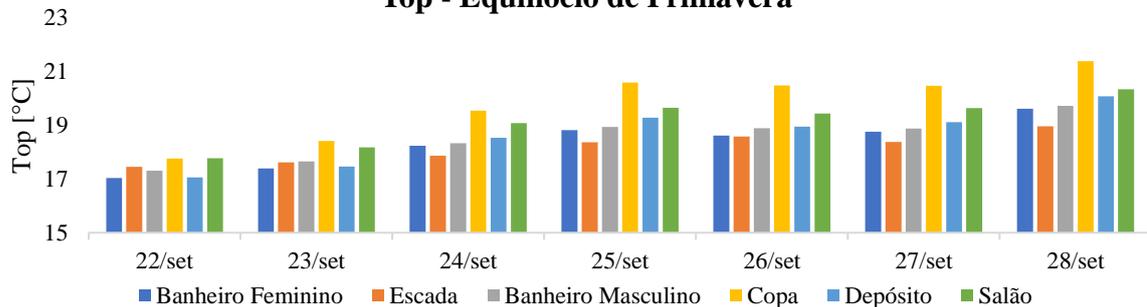


Figura 7: Distribuição de temperaturas no equinócio de primavera. Fonte: O Autor.

Verifica-se a equivalência de temperatura entre as zonas térmicas para cada estação do ano, com leves variações em função da oscilação drástica de temperaturas externas, conforme visto na Seção 3.1. Isso representa uma eficácia do sistema de climatização aplicado, mesmo com a alta taxa ocupacional da edificação em horários específicos. É perceptível a discrepância de Temperatura Operativa da Copa no equinócio de primavera, podendo ser explicado pelo menor uso do sistema de climatização tanto em aquecimento quanto em resfriamento, juntamente com a influência das taxas metabólicas das pessoas e dissipação de calor dos equipamentos elétricos, fazendo com que esta temperatura se diferencie das demais zonas térmicas.

4.3 Consumo energético

Como visto na Seção 1, o sistema de condicionamento de ar é o maior responsável pelo consumo energético das edificações em geral. Isso se comprova quando é feita esta análise anual da energia elétrica demandada pela edificação em questão, conforme a Figura 8.

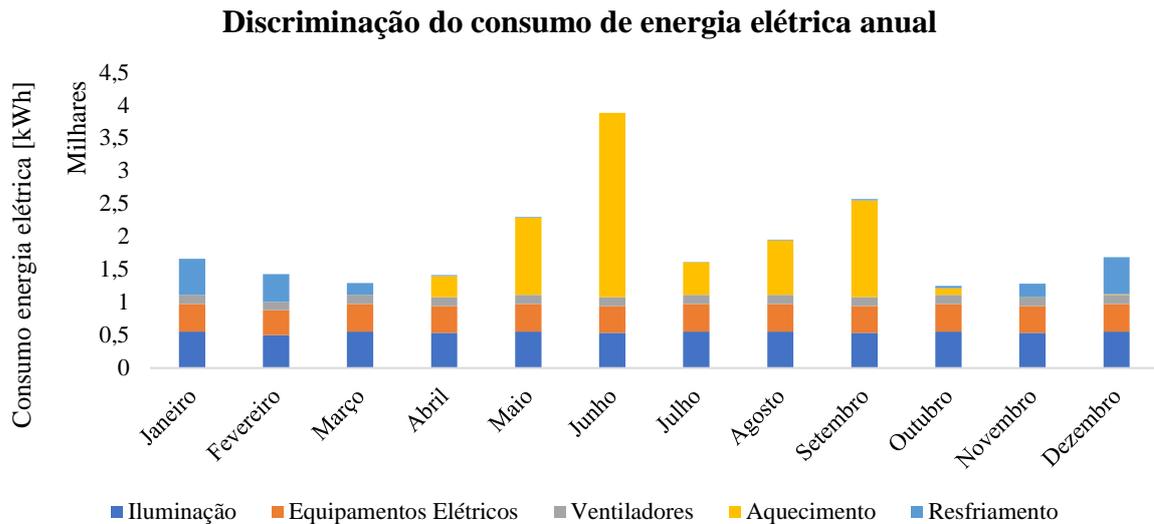


Figura 8: Consumo energético médio da edificação no ano. Fonte: O Autor.

É visível que, para os meses de verão, o sistema de resfriamento tem grande influência no consumo energético. Em contraponto, o sistema de aquecimento tem maior contribuição nos meses de inverno, devido ao fato de ser considerado aquecimento por resistência elétrica. O consumo proveniente de iluminação e equipamentos elétricos se mantém pelo fato de estar ativo na maior parte do tempo, tanto durante o dia quando durante a noite, já o sistema de resfriamento ou aquecimento é acionado durante os momentos de maior ocupação interna do salão, ou seja, no período noturno. Além do mais, existe a contribuição de consumo energético proveniente dos ventiladores ligados ao sistema de climatização, os quais tem parcela significativa do consumo energético total, conforme visto na Figura 9.

Consumo anual de Energia Elétrica [kWh;%]

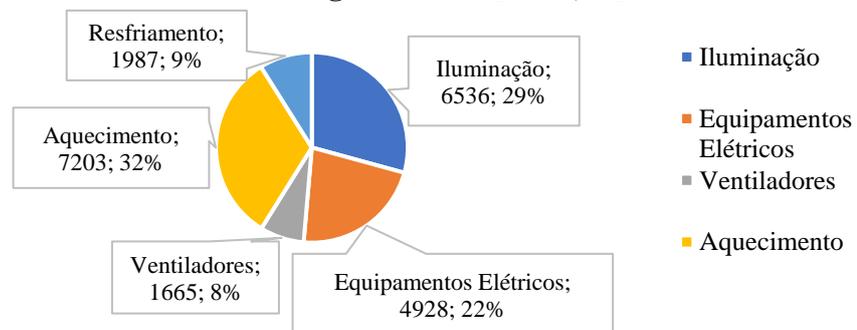


Figura 9: Distribuição do consumo de energia elétrica total da edificação. Fonte: O Autor.

Deste modo, avaliou-se que o consumo total no ano de energia elétrica edificação está em um valor aproximado de 22318 kWh por ano. Este consumo é um alto valor para edificações com este perfil, visto que possui poucos equipamentos elétricos e uma taxa ocupacional oscilante conforme os horários do dia, o que influencia diretamente no consumo de energia elétrica provinda do sistema de climatização do local.

4.4 Aplicação de métodos passivos de climatização

De modo a reduzir a temperatura média interna da edificação e, por consequência, a carga térmica provinda da radiação solar e das demais condições climatológicas da região, pode-se aplicar métodos passivos de climatização. Estes que, por sua vez, não possuem

condicionamento de ar e apenas requerem o custo inicial da instalação, não havendo consumo de energia elétrica posterior. Os métodos aplicados foram: telhado verde, brises horizontais e ventilação natural.

4.4.1 Telhado Verde

Telhado verde é uma estrutura vegetal composta por diversos tipos de vegetação que são expostos externamente às paredes e telhados de uma edificação de modo que auxiliem na redução da carga térmica interna. Segundo Junior (2015), Construção de jardins no telhado (telhado verde): com a incidência do Sol, a evapotranspiração do vegetal retira calor da cobertura, resfriando a superfície do teto. Na edificação em análise, aplicou-se o método do telhado verde apenas no telhado, substituindo as telhas de fibrocimento, sendo os seus demais parâmetros descritos no Apêndice IV.



Figura 10: Representação Esquemática de um telhado verde. Fonte: Bioclimatismo, 2016

4.4.2 Brises horizontais

Brises são estruturas que provocam sombra em janelas e paredes desejadas que sofrem com a incidência solar. Os brises horizontais são indicados para fachadas que recebem a presença da luz solar durante todo o dia, ou seja, preferencialmente em construções de posição norte (REFAX, 2021). Visando otimizar o processo de redução de temperatura interna da edificação, adotou-se como método passivo de climatização a instalação de brises horizontais nas janelas do salão e banheiro masculino. A simulação com a instalação de brises foi realizada de tal modo que a projeção deste sobre cada janela fosse de 1 m, conforme descrito no Apêndice V.



Figura 11: Ilustração da instalação de um brise. Fonte: UFRGS, 2021

4.4.3 Ventilação natural

Este é o método passivo de climatização mais utilizado no cotidiano das pessoas. Ventilação natural consta em basicamente criar uma corrente de ar interna utilizando as fenestrações (portas e janelas) de modo que o ar externo úmido possa fluir por dentro da edificação. Dentro do ambiente, este ar absorve o calor do ar e, ao sair, leva consigo uma parte considerável, fazendo com que a temperatura interna seja reduzida.

A ventilação natural de um ambiente está diretamente relacionada ao ar de renovação que por este passa. Desta forma, foi definido uma ventilação natural com ar de renovação a uma taxa de 4 renovações/hora e uma velocidade máxima do vento de 40 km/h para todas as zonas térmicas, sendo os demais parâmetros de ventilação natural representados no Apêndice VI.

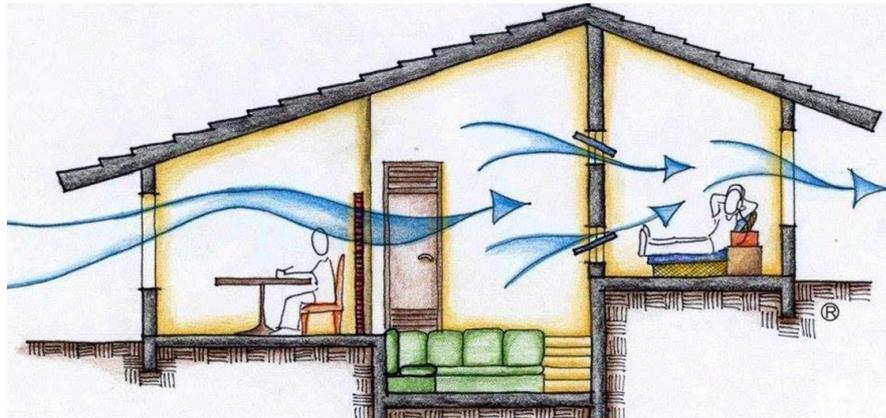


Figura 12: Representação esquemática de ventilação natural. Fonte: Sicflux, 2021

4.5 Temperatura operativa para soluções passivas

Ao replicar as condições de simulação da edificação, porém acrescentando-se junto ao sistema de climatização artificial métodos passivos de climatização, tem-se como objetivo primordial a equivalência de temperatura operativa para as diferentes estações do ano, representado pelas semanas de solstício de verão, inverno e equinócio de primavera, conforme representado nas Figuras 13, 14 e 15.

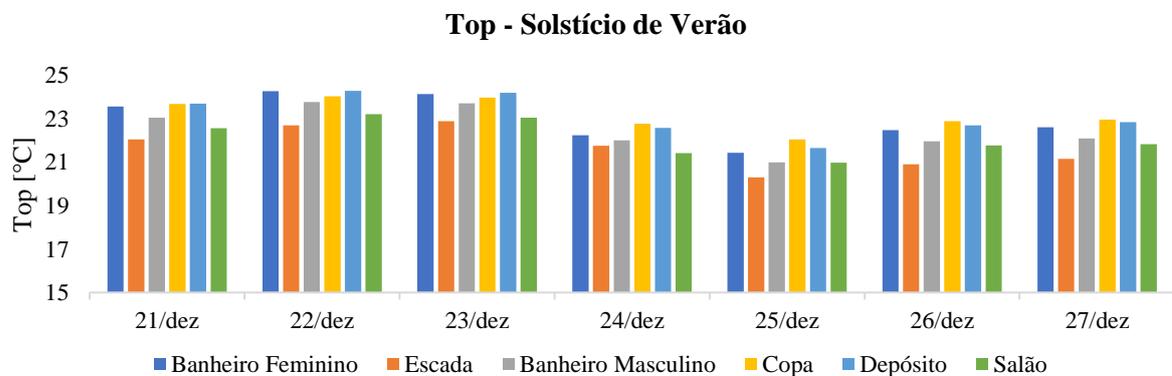


Figura 13: Distribuição de temperaturas no solstício de verão. Fonte: O Autor.

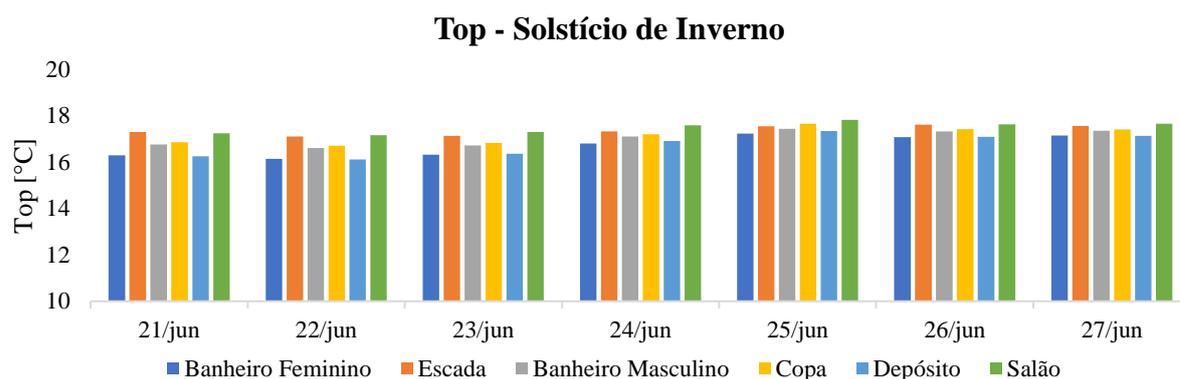


Figura 14: Distribuição de temperaturas no solstício de inverno. Fonte: O Autor

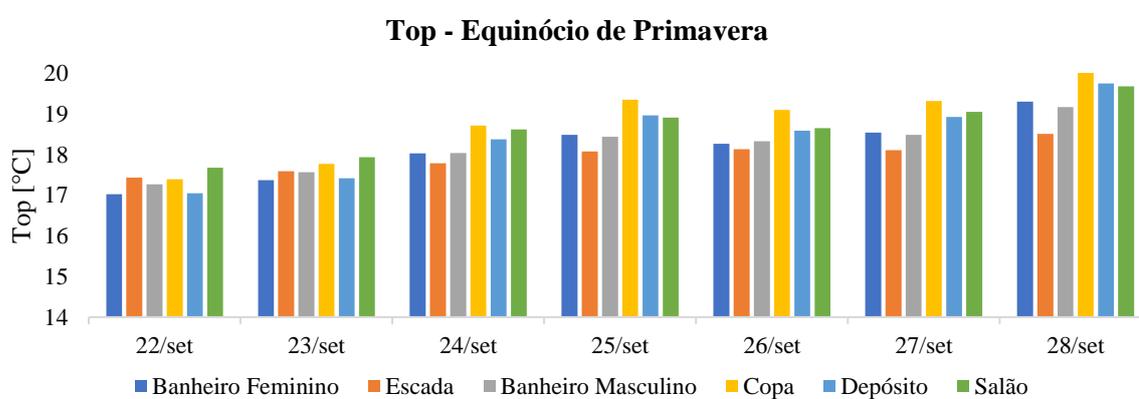


Figura 15: Distribuição de temperaturas no equinócio de primavera. Fonte: O Autor.

Verifica-se que a regularidade das temperaturas se mantém, assim como as temperaturas próximas à climatização artificial da edificação. Isto mostra que a aplicação dos métodos passivos foi eficaz, o que se traduz em redução de consumo de energia elétrica, uma vez que o condicionamento de ar terá uma menor influência no consumo energético da edificação

4.6 Análise de consumo energético com soluções passivas

Como visualizado na Seção 3.2, a influência do ar condicionado na climatização do ambiente se mostra eficaz, visto que não há alta discrepância entre as temperaturas das zonas térmicas declaradas. Contudo, este não é um método tão eficiente em termos de consumo energético pois, quando somados todos os quesitos dependentes de climatização artificial (ventiladores, refrigeração e aquecimento), resulta em uma alta demanda energética da edificação, o que contribui para os custos mensais de energia elétrica.

Quando aplicado métodos passivos de climatização na edificação, estes se mostraram eficientes quanto às condições térmicas do ambiente, reduzindo a demanda energética mensal da edificação tanto para a refrigeração quanto para o aquecimento do ambiente, conforme ilustrado na Figura 16.

Consumo anual energético com climatização passiva [kWh;%]

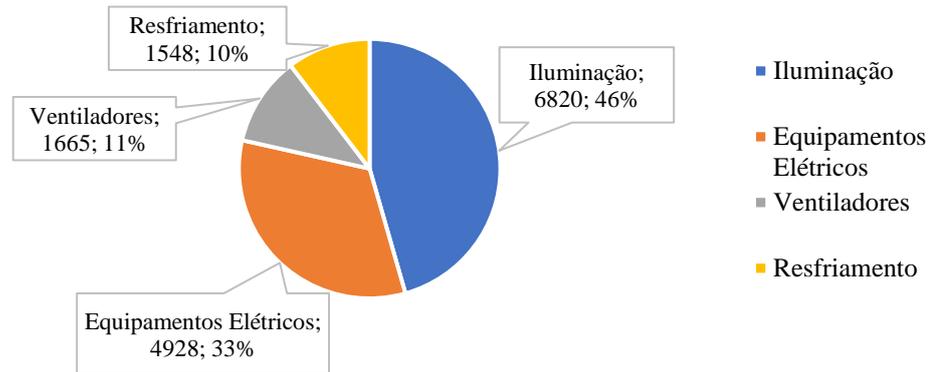


Figura 16: Distribuição do consumo de energia elétrica total da edificação. Fonte: O Autor.

Verifica-se, também, que a simulação realizada no *EnergyPlus* compreendeu que aplicação de métodos artificiais de climatização deve ser reduzida uma vez que a transferência de calor radiante entre as pessoas, equipamentos elétricos, iluminação e o ambiente externo da edificação já se encontra em um nível menor. Também é interessante avaliar a redução de consumo energético total da edificação, conforme representado na Figura 17. É possível verificar a influência dos métodos passivos de climatização para com a redução do uso do sistema de condicionamento de ar. Dentre os métodos aplicados, o telhado verde mostra-se bastante eficaz, uma vez que a alta camada de vegetação (Apêndice IV) contribui para um maior isolamento térmico da edificação tanto no verão, impedindo a incidência de radiação solar direta na edificação, quanto no inverno, acarretando em uma menor taxa de transferência de calor do ambiente interno para o externo. Os demais métodos passivos de climatização também possuem significativa contribuição para a redução a carga térmica e temperatura operativa da edificação, porém com uma representação maior para a estação do verão.

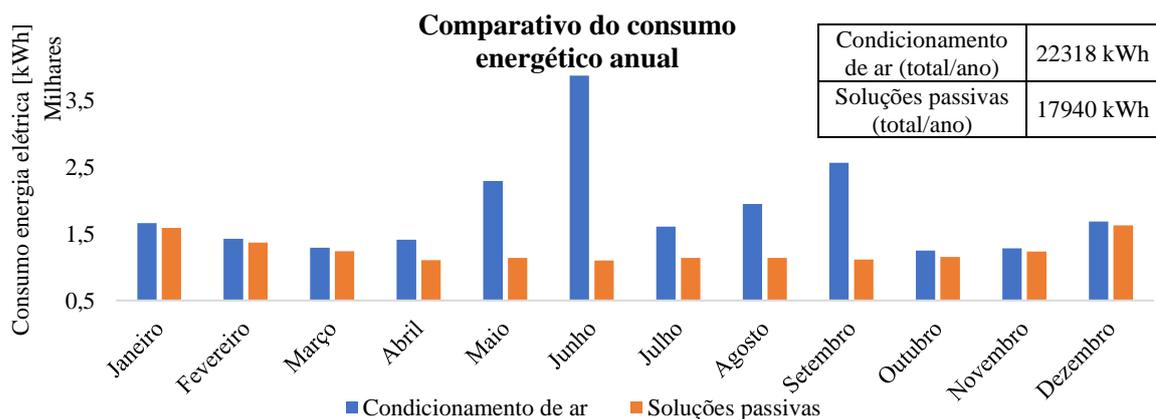


Figura 17: Comparativo do consumo energético anual. Fonte: O Autor.

5. CONCLUSÃO

É imprescindível que para um melhor conforto térmico e uma climatização adequada de um ambiente, seja ele residencial, comercial ou até mesmo industrial, se faça necessário o uso de alternativas passivas de climatização para contrapor o condicionamento artificial de ar. Atualmente o Brasil passa por uma crise de energia elétrica provinda dos baixos níveis e água dos reservatórios das hidrelétricas, e o resultado disso são tarifas de energia elétrica aumentando significativamente a cada mês fazendo com que, em muitos casos, o racionamento de energia elétrica seja realizado de forma errônea, reduzindo ou eliminando pontos primordiais para o conforto e saúde das pessoas. Por isso uma análise energética precisa das edificações e aplicação de métodos passivos de climatização devem ser considerados, preferencialmente durante o projeto arquitetônico.

Dadas as simulações realizadas com o auxílio do *EnergyPlus*, após a análise de temperatura do interior da edificação com condicionamento de ar, verificou-se que a demanda energética anual estava em um nível elevado por contribuição do sistema de climatização, principalmente em seu modo de aquecimento. A aplicação de um telhado verde, brises horizontais e da própria ventilação natural, se mostram eficazes para a redução de temperatura operativa no verão e equalização desta no inverno, o que acarreta em uma redução (por desuso do condicionamento artificial de ar) do consumo energético da edificação.

Assim, toma-se por fato que métodos passivos de climatização têm uma grande contribuição para o conforto térmico sem a necessidade de um elevado consumo energético. A redução do consumo de energia elétrica em até 20% se mostra condizente com os resultados obtidos por Caus (2019) e por Junior (2015) validando, assim, os métodos de simulação e de soluções passivas para climatização aplicados. Por proposta de melhoria, é interessante avaliar modelos de soluções alternativas às apresentadas neste trabalho, como instalação de películas nos vidros, materiais de construção alternativos, pintura das paredes com menor coeficiente de absorção térmica e outros métodos, visando reduzir o seu custo de instalação e, em determinados casos, custo de manutenção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. "**Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**". ABNT NBR 15220-2:2005, 2005b.

ABNT. "**Edificações Habitacionais. Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**". ABNT-NBR 15575-1:2013, 2013.

ASHRAE. <http://ashrae-meteo.info>, 2021. "**Dados climáticos de Frederico Westphalen**". Disponível em: <<http://ashrae-meteo.info/v2.0/index.php>>. Acesso em: 16 de agosto de 2021.

BIOCLIMATISMO. "**Telhado Verde**". Disponível em: <<https://bioclimatismo.com.br/teelhado-verde/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2021.

CAUS, Aléxia Barbieri. "**Estudo de adaptação de uma casa modelo para residência unifamiliar em Porto Alegre**". Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

DE BONA, Renan Marcos. "**Classificação energética de uma sala comercial. Estudo de caso: academia smart fit**". Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

JUNIOR, Jair Alberto Felice. "**O uso de estratégias bioclimáticas para benefício do conforto térmico e economia energética das edificações**". Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

LAMBERTS, R. e Duarte V.C.P., 2016. "**Desempenho Térmico de Edificações (Apostila da disciplina ECV 5161)**". Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/antigo/graduacao/ecv_5161/ecv_5161.html>

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. "**Engineering Reference – EnergyPlus**". U.S. Department of Energy. USA: 2021b.

PEDON, Thiago Henrique.; "**Projeto Salão Paroquial**". Projeto arquitetônico, Palmitinho/RS, 2020.

POZZA, Fernando. "**Análise Térmica e Energética de uma Edificação Residencial Climatizada com Sistema de Fluxo Refrigerante Variável – VRF**". Dissertação de mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

PROCEL – "**Programa nacional de Conservação de Energia Elétrica**". Disponível em: <<http://www.procel.gov.br>> Acesso em: 26 de Out. 2021.

REFAX. "**Brisas horizontais de verticais: principais vantagens de cada modelo**". Disponível em: <<https://www.refax.com.br/blog/brises-verticais-e-horizontais-principais-vantagens-de-cada-modelo>>. Acessado em 07 de novembro de 2021.

SICFLUX. "**O que você precisa saber sobre ventilação natural**". Disponível em: <<https://sicflux.com.br/blog/o-que-voce-precisa-saber-sobre-ventilacao/>>. Acessado em 30 de novembro de 2021.

UFRGS. "**Liberado o Prédio de Salas de Aula do Campus Centro**". Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ufrgs/noticias/liberado-o-predio-de-salas-de-aula-do-campus-centro>>. Acessado em 30 de novembro de 2021.

WESTPHAL, F.S. "**Introdução ao EnergyPus v8.7.0**". Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

7. APÊNDICES

APÊNDICE I – Parâmetros da Taxa de ocupação – Schedules.

Name		PessoasCopa	PessoasSalao
Schedule Type Limits Name		24horas	24horas
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31
Field 2	varies	For: AllDay	For: AllDay
Field 3	varies	Until: 06:00	Until: 06:00
Field 4	varies	189	150
Field 5	varies	Until: 12:00	Until: 12:00
Field 6	varies	117	117
Field 7	varies	Until: 18:00	Until: 18:00
Field 8	varies	117	117
Field 9	varies	Until: 24:00	Until: 24:00
Field 10	varies	189	150

APÊNDICE II – Parâmetros de Iluminação e Equipamentos Elétricos.

Name		Salao	Copa	WCMasc	WCFem	Escada	Deposito
Zone or ZoneList Name		Salao	Copa	BanheiroMa:	BanheiroFem	Escada	Deposito
Schedule Name		Iluminacao	Iluminacao	Iluminacao	Iluminacao	Iluminacao	Iluminacao
Design Level Calculation Method		Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area
Lighting Level	W						
Watts per Zone Floor Area	W/m2	0,96	1,27	2	1,9	1	1,9
Watts per Person	W/person						
Return Air Fraction		0	0	0	0	0	0
Fraction Radiant		0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Fraction Visible		0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Fraction Replaceable		1	1	1	1	1	1

Field	Units	Obj1
Name		EquipCopa
Zone or ZoneList Name		Copa
Schedule Name		EquipamentosGerai:
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel
Design Level	W	750
Watts per Zone Floor Area	W/m2	
Watts per Person	W/person	
Fraction Latent		
Fraction Radiant		
Fraction Lost		
End-Use Subcategory		General

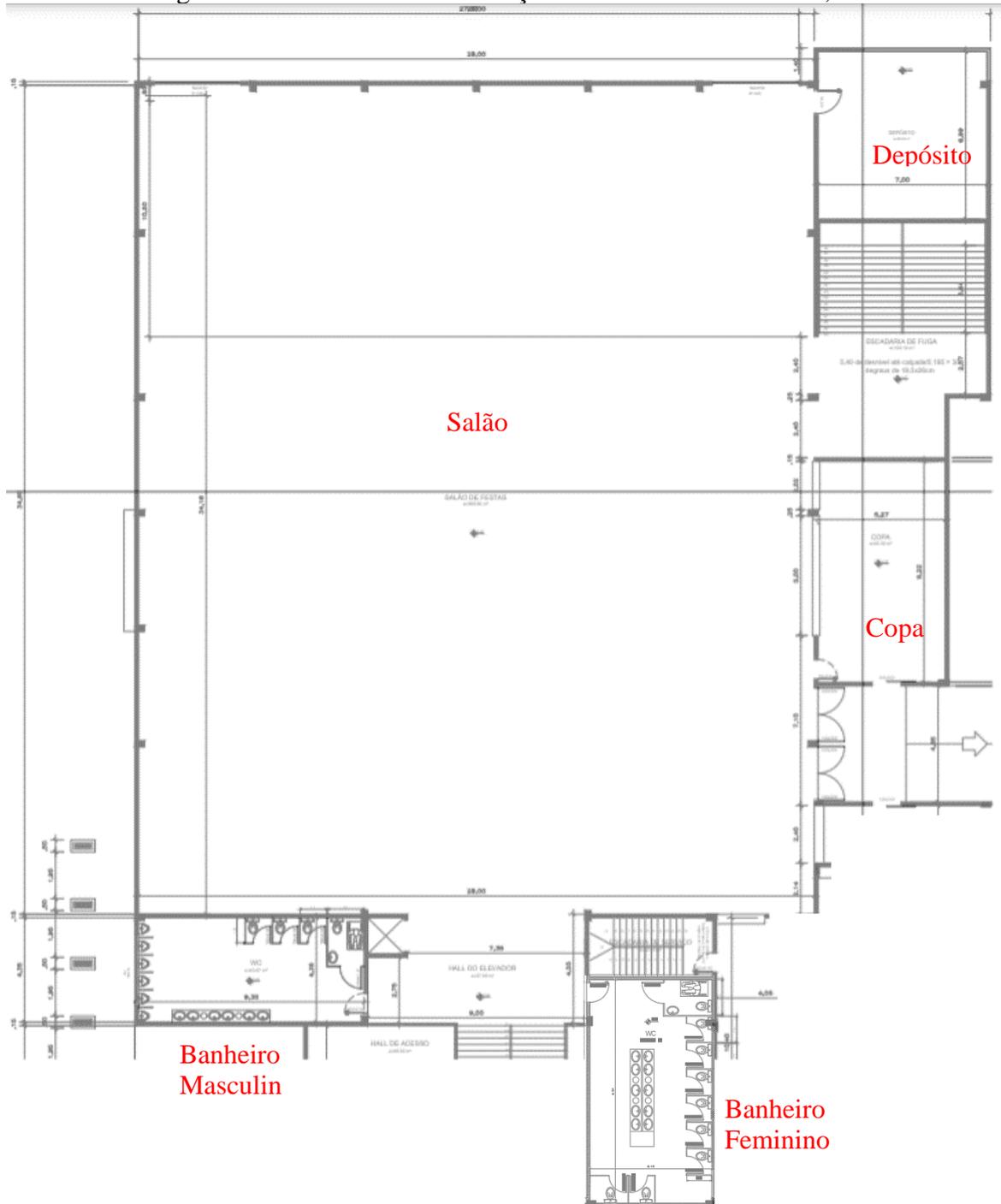
APÊNDICE VI - Parâmetros de simulação de ventilação natural.

Name		VentilacaoSalao	VentilacaoCopa	VentilacaoBanFem	VentilacaoBanMasc	VentilacaoEscada	VentilacaoDeposito
Zone or ZoneList Name		Salao	Copa	BanheiroFeminino	BanheiroMasculino	Escada	Deposito
Schedule Name		Infiltracao	Infiltracao	Infiltracao	Infiltracao	Infiltracao	Infiltracao
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s						
Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2						
Flow Rate per Person	m3/s-person						
Air Changes per Hour	1/hr	4	4	4	4	4	1
Ventilation Type		Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Maximum Wind Speed	m/s	40	40	40	40	40	40

8. ANEXOS

ANEXO I – Planta baixa.

Figura A: Planta baixa da edificação analisada. Fonte: Pedon, 2020.



ANEXO II – Tabela de propriedades dos materiais.

Tabela A: Composição e propriedades dos elementos de construção. Fonte: Lamberts, 2016.

Elemento de construção	Camada	Espessura e (m)	Condutividade térmica λ (W/m.K)	Densidade ρ (kg/m ³)	Calor específico c (J/kg.K)	Absortância Solar α
Piso	Laje	0,2	0,2	2500	920	-
Parede Externa	Argamassa	0,0025	1,15	1950	1000	0,4
	Tijolo	0,15	0,9	1600	920	
	Argamassa	0,0025	1,15	1950	1000	
Parede Interna	Argamassa	0,0025	1,15	1950	1000	0,4
	Tijolo	0,15	0,9	1600	920	
	Argamassa	0,0025	1,15	1950	1000	
Forro	Gesso Acartonado	0,02	0,35	800	840	-
	Câmara de Ar	1	0,0263	1,225	1007	-
	Laje	0,2	0,2	2500	920	-
Cobertura	Telhado Fibrocimento	0,006	0,95	2000	840	0,4
	Telhado Sanduíche	0,06	0,314	35	1040	0,4
Porta Emergência	Aço Galvanizado	0,02	51,9	7800	486	0,4
Porta Madeira	Madeira Pinus	0,01	0,29	500	1340	-

Tabela B: Composição e propriedades dos elementos translúcidos. Lamberts, 2016.

Elemento de construção	Camada	Espessura e (m)	Transmitância solar para incidência normal U	Refletância solar ρ	Condutividade térmica λ (W/m.K)	Emissividade hemisférica ϵ
Janelas	Vidro	0,006	0,775	0,08	0,9	0,84