

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PEDRO BRANDÃO CAMPANI

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO PRÉDIO
ADMINISTRATIVO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, CAMPUS
ALEGRETE**

**Alegrete
2018**

PEDRO BRANDÃO CAMPANI

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO PRÉDIO
ADMINISTRATIVO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, CAMPUS
ALEGRETE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto

**Alegrete
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo autor através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C186a Campani, Pedro Brandão
ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO PRÉDIO
ADMINISTRATIVO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, CAMPUS
ALEGRETE / Pedro Brandão Campani.
81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2018.
"Orientação: Adriano Roberto da Silva Carotenuto".

1. Conforto Térmico. 2. Energia Elétrica. 3. EnergyPlus. 4.
HVAC. 5. VRF. I. Título.

PEDRO BRANDÃO CAMPANI

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DO PRÉDIO
ADMINISTRATIVO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, CAMPUS
ALEGRETE**

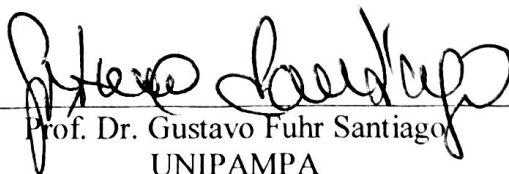
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28 de junho de 2018.

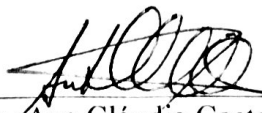
Banca examinadora:



Prof. Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Gustavo Fuhr Santiago
UNIPAMPA



Prof. Dra. Ana Cláudia Costa de Oliveira
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, especialmente minha mãe Carla, meu pai Ricardo, meu tio George, meu avô José Carlos, minha avó Eliza e a Rozelaine, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao Professor Doutor Adriano Carotenuto, pela atenção, paciência, apoio e os valiosos conhecimentos transmitidos na orientação deste trabalho.

Aos professores da Universidade Federal do Pampa, principalmente os do curso de Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos e pelo auxílio nesta trajetória.

Meus agradecimentos aos amigos que fizeram parte desta caminhada e com certeza continuarão presentes em minha vida.

RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade analisar o desempenho termoenergético do prédio administrativo da Universidade Federal do Pampa, localizado na cidade de Alegrete – RS, com o objetivo de propor melhorias em relação à envoltória e ao sistema de climatização, que visam reduzir o consumo de energia elétrica e maximizar o conforto térmico dos ocupantes. O *software* utilizado para as simulações foi o EnergyPlus versão 8.7, sendo empregados 14 dias de projeto para o dimensionamento do sistema de ar condicionado e o arquivo climático para obtenção do consumo de energia elétrica. A edificação em análise foi dividida em 66 zonas térmicas, sendo 39 climatizadas. Primeiramente, foram realizadas simulações para se obter as potências de refrigeração e aquecimento de cada zona térmica climatizada, através do modo *Ideal Loads Air System*, sendo estas comparadas com as potências do sistema *Split* instalado atualmente, onde constatou-se que 38 zonas contavam em média com 42% acima da potência ideal de refrigeração e 41% em relação a de aquecimento. Através da análise da zona térmica 1, que representa a biblioteca do campus, a qual conta com uma área superficial externa com aproximadamente 50% em vidros, foi proposta a substituição dos vidros simples atuais por vidros duplos, resultando em uma redução média de 13% da potência ideal de refrigeração e 18% em relação à potência ideal de aquecimento. Através dessas potências foi selecionado um novo sistema de ar condicionado do tipo VRF (Vazão de Refrigerante Variável), acarretando uma redução no consumo de energia elétrica anual de aproximadamente 18,6% em relação a todo o consumo da edificação e de 55,2% se comparado somente ao consumo do sistema de climatização atual. Por fim, foi analisado o conforto térmico da biblioteca, constatando um PMV (Voto Médio Predito) de +0,92 para o caso e base e de +0,82 para o caso proposto. Tal redução está associada a diminuição da temperatura média radiante ocasionada pela substituição dos vidros, porém em ambos os casos os valores estão acima do intervalo recomendado do PMV (-0,5/+0,5) para conforto térmico.

Palavras-chave: EnergyPlus, HVAC, Conforto Térmico, VRF, Energia Elétrica.

ABSTRACT

The present work has the objective of analyzing the thermoenergetic performance of the administrative building of the Federal University of Pampa, located in Alegrete city – Rio Grande do Sul State, by proposing improvements in the building envelope and air conditioning system, with views to reduce the building energy consumption and maintain the thermal comfort of the occupants within the acceptable levels. The software used for the simulations was Energyplus version 8.7 and they were based on 14 design days conditions to size the air conditioning system and on city weather data to calculate the building energy consumption. The building under analysis was arranged into 66 thermal zones, in which 39 zones have air conditioned equipments installed (packaged terminal air to air heat pump), popular *splits*. Firstly, the simulations were performed to obtain the cooling and heating capacities for each thermal zone by applying the Ideal Loads Air System mode, whose results were compared with air conditioning capacities currently installed. The simulations showed that 38 zones are oversized 42% and 41% on average above the nominal cooling and heating capacities respectively. By analyzing the campus library, which has an external surface area of nearly 50% in window glasses, the simulation of the replacement of the current single window glazing by the insulated window glazing, resulted in a reduction of 13% and 18% on average of cooling and heating capacities respectively. The VRF (Variable Refrigerant Flow) air conditioning system simulation showed an annual electricity energy consumption reduction of approximately 18,6% in relation to all building energy consumption, and 55,2% reduction compared to the current air conditioning system. The campus library PMV results are +0.92 and +0.82 with the single and insulated window glazing respectively. This last one result was strongly influenced by the mean radiant temperature reduction, but it is still above the PMV interval recommendation (-0.5/+0.5) for the thermal comfort.

Keywords: Energyplus, HVAC, Thermal comfort, VRF, Energy consumption

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Carga térmica.....	7
Figura 2 - Zona de conforto térmico para verão e inverno.....	9
Figura 3 - Balanço de energia nas superfícies externas	12
Figura 4 - Balanço de energia nas superfícies internas	14
Figura 5 - Etapas da metodologia	15
Figura 6 - Prédio administrativo da UNIPAMPA campus Alegrete	18
Figura 7 - Vista aérea da edificação.....	19
Figura 8 - Zoneamento térmico do térreo.....	20
Figura 9 - Zoneamento térmico do segundo pavimento	20
Figura 10 - Zoneamento térmico do terceiro pavimento.....	21
Figura 11 - Zoneamento térmico da cobertura	21
Figura 12 - Fachada oeste.....	21
Figura 13 - Fachada leste	22
Figura 14 - Fachada sul.....	22
Figura 15 - Fachada norte.....	22
Figura 16 - Comparação entre a potência instalada x potência ideal para o térreo	32
Figura 17 - Comparação entre a potência instalada x potência ideal para o 2º pavimento	32
Figura 18 - Comparação entre a potência instalada x potência ideal para o 3º pavimento	33
Figura 19 - Vidro duplo.....	34
Figura 20 - Potência empregando melhorias x Potência ideal para o térreo	35
Figura 21 - Potência empregando melhorias x Potência ideal para o 2º pavimento	35
Figura 22 - Potência empregando melhorias x Potência Ideal para o 3º pavimento	36
Figura 23 - Perfil do consumo de energia elétrica anual da edificação atual.....	37
Figura 24 - Consumo de energia elétrica mensal da edificação atual.....	37
Figura 25 - Perfil de consumo de energia elétrica para o novo sistema.....	39
Figura 26 - Consumo de energia elétrica mensal do novo sistema.....	40
Figura 27 - Comparação entre os consumos de energia elétrica do caso base e proposto.....	41
Figura 28 - Comparação entre consumo de energia elétrica mensal do sistema <i>Split</i> x VRF.....	41
Figura 29 - Temperatura média horária do ar da zona 1 para o caso base.....	43
Figura 30 - Umidade relativa horária da zona 1 para o caso base	44
Figura 31 - Temperatura média radiante horária da zona 1 para o caso base	44
Figura 32 - Temperatura operativa horária da zona 1 para o caso base.....	45
Figura 33 - Voto médio predito horário da zona 1 para o caso base	45
Figura 34 - Temperatura média do ar horária da zona 1 para o caso proposto	46
Figura 35 - Umidade relativa horária da zona 1 para o caso proposto	46
Figura 36 - Comparação entre as temperaturas médias radiante para o caso base e proposto	47
Figura 37 - Comparação entre as temperaturas operativas para o caso base e proposto	47
Figura 38 - Comparação entre o Voto Médio Predito para o caso base e proposto	48
Figura 1.A - Planta baixa térreo.....	58
Figura 1.B - Planta baixa segundo pavimento.....	58
Figura 1.C - Planta baixa terceiro pavimento.....	59
Figura 1.D - Planta baixa da cobertura	59
Figura 1.E - Fachada Oeste	60
Figura 1.F - Fachada leste	60
Figura 1.G - Fachada sul	60
Figura 1.H - Fachada norte.....	61
Figura 1.I - Corte A-A.....	61

Figura 1.J - Corte B-B.....	62
Figura 1.K - Corte C-C.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização geográfica da edificação.....	19
Tabela 2 - Propriedades termofísicas dos elementos construtivos do prédio.....	23
Tabela 3 - Propriedades ópticas e físicas dos vidros empregados na edificação.....	24
Tabela 4 - Propriedades ópticas e físicas da cortina utilizada no prédio	25
Tabela 5 - Dia de projeto de verão para temperatura de bulbo seco.....	27
Tabela 6 - Dia de projeto de verão para temperatura de bulbo úmido.....	28
Tabela 7 - Dia de projeto de verão para conteúdo de umidade	28
Tabela 8 - Dia de projeto de inverno com nebulosidade.....	29
Tabela 9 - Dia de projeto de inverno para o céu sem nebulosidade	29
Tabela 10 - Propriedades ópticas do vidro duplo	34
Tabela 11 - Máquinas externas VRF	39
Tabela B.1 - Potências ideais de refrigeração e aquecimento	56
Tabela C.1 - Potências para a nova configuração da envoltória.....	57
Tabela 2.A - Potências de refrigeração e aquecimento instaladas atualmente	63
Tabela 3.A - Informações técnicas das unidades internas VRF	64

LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerant and Air-Conditioning* ou Associação Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado
- CB3e – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- CGIEE – Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética
- CTF – *Conduction Transfer Function* ou Funções de Transferência por Condução
- ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
- DOE – *Department of Energy* ou Departamento de Energia dos Estados Unidos
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- EPS – *Expanded Polystyrene* ou Poliestireno Expandido
- IN – Instrução Normativa
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
- LED – *Light Emitting Diode* ou Diodo Emissor de Luz
- MME – Ministério de Minas e Energias
- NBR – Norma Brasileira de Regulamentação
- NREL – *National Renewable Energy Laboratory* ou Laboratório Nacional de Energia Renovável
- PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem
- PMV – *Predicted Mean Vote* ou Voto Médio Predito
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
- STIC – Setor de Tecnologia da Informação e Comunicação
- UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa
- VRF – *Variable Refrigerant Flow* ou Vazão de Refrigerante Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Coeficiente de ajuste do cálculo de infiltração	[-]
A_{si}	Área da superfície “i” da zona	[m ²]
B	Coeficiente de ajuste do cálculo de infiltração	[-]
C	Coeficiente de ajuste do cálculo de infiltração	[-]
C_p	Calor específico do ar	[J/kg.K]
$C_{p,m}$	Calor específico do material	[J/kg.K]
C_T	Multiplicador da capacidade de calor sensível da zona térmica	[-]
C_z	Capacitância térmica do ar da zona	[J/K]
D	Coeficiente de ajuste do cálculo de infiltração	[-]
D_{vent}	Direção do vento	[°]
e_m	Espessura do material	[cm]
$e_{m,v}$	Espessura do vidro	[mm]
$f_{ar\ de\ retorno}$	Fração de calor devido ao ar de retorno nas luminárias	[-]
$f_{conv,e}$	Fração convectiva dos equipamentos	[-]
$f_{conv,i}$	Fração convectiva do sistema de iluminação	[-]
F_{gnd}	Fator de forma entre a superfície da parede e a superfície do solo	[-]
$f_{latente}$	Fração de calor latente dissipada pelos equipamentos	[-]
$f_{perdida}$	Fração de calor perdida pelos equipamentos	[-]
$f_{radiante,e}$	Fração radiante dos equipamentos	[-]
$f_{radiante,i}$	Fração radiante do sistema de iluminação	[-]
F_{sky}	Fator de forma entre a superfície da parede e o céu	[-]
F_I	Fração da taxa de infiltração de ar de projeto	[-]
$f_{visível}$	Fração visível do sistema de iluminação	[-]
h_i	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície “i” da zona	[W/m ² .K]
$h_{r,air}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação do ar linearizado	[W/m ² .K]
$h_{r,gnd}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação do solo linearizado	[W/m ² .K]
$h_{r,sky}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação do céu linearizado	[W/m ² .K]
I	Troca de ar por hora ou taxa de infiltração de ar	[1/h]

$I_{projeto}$	Taxa de infiltração de ar de projeto	[1/h]
k	Condutividade térmica do vidro	[W/m.K]
k_m	Condutividade térmica do material	[W/m.K]
L_{cv}	Distância da cortina em relação ao vidro	[m]
\dot{m}_i	Vazão mássica de ar da zona “i”	[kg/s]
\dot{m}_{inf}	Vazão mássica de infiltração de ar na zona térmica	[kg/s]
\dot{m}_{sys}	Vazão mássica que adentra a zona térmica proveniente do sistema de ar condicionado	[kg/s]
MT_{bs}	Média coincidente da temperatura de bulbo seco	[°C]
MT_{bu}	Média coincidente da temperatura de bulbo úmido	[°C]
q''_{air}	Fluxo de energia radiante entre a superfície da zona térmica e o ar	[W/m ²]
q''_{conv}	Fluxo de calor devido a troca de calor por convecção entre a superfície e o meio externo	[W/m ²]
$q''_{conv,i}$	Fluxo de calor por convecção do ar da zona	[W/m ²]
q''_{gnd}	Fluxo de energia radiante entre a superfície da zona térmica e o solo	[W/m ²]
q''_{ki}	Fluxo de calor por condução na face interna da parede	[W/m ²]
q''_{ko}	Fluxo de calor por condução na face externa da parede	[W/m ²]
q''_{LWR}	Fluxo líquido de energia radiante de onda longa trocado com o meio e as superfícies em volta	[W/m ²]
q''_{LWS}	Fluxo de energia radiante de onda longa trocado entre a superfície e os equipamentos	[W/m ²]
q''_{LWX}	Fluxo líquido de energia radiante de onda longa trocado entre as superfícies	[W/m ²]
q''_{sky}	Fluxo de energia radiante entre a superfície da zona térmica e o céu	[W/m ²]
q''_{sol}	Fluxo de energia por radiação solar transmitida e absorvida pela superfície	[W/m ²]
q''_{sw}	Fluxo líquido de energia radiante de ondas curtas trocado entre a superfície e o sistema de iluminação	[W/m ²]
q''_{asol}	Fluxo de energia por radiação solar transmitida e absorvida pela superfície	[W/m ²]
R_{bs}	Refletância solar na direção normal à superfície interna do vidro integrado em toda a faixa do espectro solar	[-]
R_{bv}	Refletância visível na direção normal à superfície interna do vidro integrado na faixa visível do espectro solar ponderado pela resposta fotóptica do olho humano	[-]

R_{fs}	Refletância solar na direção normal à superfície externa do vidro integrado em toda a faixa do espectro solar	[-]
R_{fv}	Refletância visível na direção normal à superfície externa do vidro integrado na faixa visível do espectro solar ponderado pela resposta fotóptica do olho humano	[-]
t	Passo de tempo atual	[s]
T_{air}	Temperatura do ar	[K]
$T_{bs,externa}$	Temperatura de bulbos seco externa	[°C]
T_{gnd}	Temperatura do solo	[K]
T_i	Temperatura da face interna da superfície do elemento construtivo	[°C]
$T_{i,t-j\delta}$	Temperatura da face interna da superfície no passo de tempo anterior	[°C]
T_o	Temperatura da face externa da superfície do elemento construtivo	[°C]
$T_{orvalho}$	Temperatura do ponto de orvalho	[°C]
$T_{o,t-j\delta}$	Temperatura da face externa da superfície no passo de tempo anterior	[°C]
T_{si}	Temperatura da superfície “i” da zona	[°C]
T_{sky}	Temperatura do céu	[K]
T_{sup}	Temperatura do ar insuflado pelo sistema de ar condicionado	[°C]
T_{surf}	Temperatura da superfície externa da zona térmica	[K]
T_z	Temperatura média do ar da zona térmica em análise	[°C]
T_{zi}	Temperatura média do ar da zona i ou zona adjacente	[°C]
T_{∞}	Temperatura ambiente do ar exterior	[°C]
U	Velocidade do vento	[m/s]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
$V_{méd}$	Média coincidente da velocidade do vento	[m/s]
w	Conteúdo de umidade do ar em gramas de vapor d’água por kg de ar seco	$[g_w/kg_a]$
X_j	Coeficiente de fator de resposta externo da CTF	[-]
Y_j	Coeficiente de fator de resposta cruzado da CTF	[-]
Z_j	Coeficiente de fator de resposta interno da CTF	[-]

Símbolos Gregos

α_t	Absortividade da radiação térmica de onda longa na temperatura da superfície em 300 K	[-]
α_s	Absortividade da radiação solar integrado em todo o espectro do comprimento de onda (ultravioleta, visível e infravermelho)	[-]
α_v	Absortividade da radiação solar integrada no espectro do comprimento de onda visível	[-]
ΔT_{bs}	Amplitude de variação da temperatura de bulbo seco	[°C]
ΔT_{bu}	Amplitude de variação da temperatura de bulbo úmido	[°C]
ε	Emissividade da superfície para onda longa	[-]
ε_b	Emissividade hemisférica da superfície interna do vidro no infravermelho	[-]
ε_f	Emissividade hemisférica da superfície externa do vidro no infravermelho	[-]
ρ_{air}	Densidade do ar da zona térmica	[kg/m ³]
ρ_m	Densidade do material	[kg/m ³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
τ_{ir}	Transmitância na direção normal à superfície do vidro integrada em toda a faixa do comprimento de onda longa (infravermelho) do espectro solar	[-]
τ_s	Transmitância solar na direção normal à superfície do vidro integrado sobre toda a faixa do espectro solar	[-]
τ_v	Transmitância visível na direção normal à superfície do vidro integrado na faixa visível do espectro solar ponderado pela resposta fotóptica do olho humano	[-]
ϕ_j	Coefficiente de fator de resposta de fluxo da CTF	[-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Trabalhos Relacionados.....	3
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1 Definições	5
3.1.1 Eficiência Energética	5
3.1.2 Carga Térmica	6
3.1.3 Conforto Térmico	7
3.2 Equacionamento.....	9
3.2.1 Equação do Balanço de Energia da Zona Térmica.....	10
3.2.2 Transferência de Calor por Condução Através das Paredes	11
3.2.3 Balanço de Energia nas Superfícies Externas	12
3.2.4 Balanço de Energia nas Superfícies Internas	14
4 METODOLOGIA	15
4.1 Ferramentas Computacionais.....	17
4.1.1 AutoCAD	17
4.1.2 SketchUp.....	17
4.1.3 OpenStudio.....	17
4.1.4 EnergyPlus	17
5 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	18
5.1 Edificação – Prédio Administrativo	18
5.2 Zoneamento Térmico	19
5.3 Elementos Construtivos da Edificação	22
5.4 Cargas Internas.....	25
5.4.1 Iluminação.....	25
5.4.2 Equipamentos Elétricos	25
5.4.3 Ocupação.....	26
5.5 Cargas Externas.....	26
5.5.1 Arquivo Climático e Dias de Projeto.....	26
5.5.2 Infiltrações	29
6 RESULTADOS	30
6.1 Potências de Refrigeração e Aquecimento	30
6.1.1 Potências Ideais	30

6.1.2 Potência Instalada x Potência Ideal	31
6.1.3 Potência Ideal Empregando Melhorias x Potência Ideal	33
6.2 Consumo de Energia Elétrica.....	36
6.2.1 Consumo Atual da Edificação.....	37
6.2.2 Consumo do Novo Sistema.....	38
6.2.3 Atual x Proposto	40
6.3 Conforto Térmico	42
6.3.1 Caso Atual.....	43
6.3.2 Caso Proposto.....	46
7 CONCLUSÕES	49
8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	50
9 REFERÊNCIAS	51
APÊNDICES	55
A – Descrição das Zonas Térmicas.....	55
B – Potências Ideais de Refrigeração e Aquecimento	56
C – Potências Ideais para a Nova Configuração de Envoltória	57
ANEXOS	58
1 – Plantas Baixas e Cortes	58
2 – Potências das Máquinas <i>Split</i> Instaladas Atualmente.....	63
3 – Máquinas Internas VRF.....	64

1 INTRODUÇÃO

O tema eficiência energética vem sendo cada vez mais difundido e exigido no cenário atual, tornando indispensável o emprego de soluções que promovam uma redução considerável do consumo de energia. Dentre os itens que mais impactam sobre o consumo energético em edificações, pode-se destacar o sistema de condicionamento de ar, que em grande parte dos casos é instalado sem um estudo prévio da carga térmica, acarretando em um sistema dimensionado de forma incorreta. Visto isso, é de suma importância a análise analítica ou computacional da carga térmica da edificação, levando em consideração todos os ganhos de calor dos ambientes, podendo estes serem provenientes do meio externo, como a radiação solar, e do meio interno, tal como o sistema de iluminação e os equipamentos. Esta análise acaba por dar suporte à seleção de sistemas de ar condicionado mais eficientes, que supram a demanda e garantam o conforto térmico.

A avaliação termoenergética de uma edificação visa identificar problemas ou aprimorar a relação entre conforto térmico aos ocupantes e um baixo consumo de energia elétrica. Tal avaliação abrange analisar e propor melhorias com intuito de reduzir a transferência de calor através das superfícies que compõem a envoltória como paredes, janelas, forros e telhados, e também verificar a dissipação de calor dos sistemas de iluminação, equipamentos e pessoas, objetivando um sistema de ar condicionado que atenda às necessidades, evitando desperdícios e reduzindo o consumo de energia elétrica.

O prédio administrativo da Universidade Federal do Pampa, localizado na cidade de Alegrete, foi inaugurado no ano de 2011, proporcionando na época um aumento considerável no que diz respeito à infraestrutura do campus, visto que esse possibilitou um amplo espaço destinado principalmente à biblioteca, secretarias e diversas salas para os professores. Portanto, o presente trabalho tem por finalidade apresentar a simulação computacional, através do *software* EnergyPlus, do referido prédio, visando obter o desempenho termoenergético da edificação. Neste estudo serão levantadas as potências ideais de refrigeração e aquecimento para cada zona climatizada, sendo estas comparadas com as potências das máquinas *Split* instaladas atualmente. Na sequência, serão propostas e analisadas modificações na configuração atual da envoltória da edificação e a instalação de um sistema de ar condicionado mais eficiente do tipo VRF (Vazão de Refrigerante Variável), sendo ao final comparados os consumos de energia elétrica e o conforto térmico do caso atual com o caso proposto.

1.1 Motivação

Desde a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em meados dos anos oitenta, normalizados pelo INMETRO, operacionalizados pela Eletrobrás e coordenados pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o Brasil vem adotando medidas responsáveis pelo uso eficiente da energia elétrica, combatendo seu desperdício e conscientizando os consumidores.

O PBE tem por objetivo apresentar o desempenho e o consumo de energia de cada equipamento, porém, tornou-se obrigatório somente em 2001 com a criação da Lei 10.295, conhecida como “Lei da Eficiência Energética”, e também o decreto N° 4.059/2001 que institui Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE), sendo estes responsáveis pelos valores mínimos para eficiência energética, ou seja, valores máximos de consumo específico de energia para cada equipamento. Segundo o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) (2014), desde 2000 a etiquetagem resultou na economia de R\$ 23 milhões em sistemas de iluminação e de R\$ 6 bilhões em sistemas de climatização.

Conforme o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3e) (2014), as edificações, tanto residenciais como públicas, representam um alto consumo de energia. Visto isso, em 2003 foi criado o PROCEL Edifica, tendo como intuito a aplicação de medidas de eficiência energética em imóveis, sendo avaliado através da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) em três itens: sistema de iluminação, envoltória da edificação e sistema de climatização.

Em 04 de junho de 2014 foi colocada em ação a Instrução Normativa n° 2, na qual ficou determinado que todo prédio público construído a partir desta data, deveria ser projetado e executado para obtenção da ENCE geral de Projeto classe “A” e de Edificação Construída Classe “A”. No caso de qualquer alteração estrutural ou substituição do sistema de iluminação ou climatização instalado em prédios públicos, construídos anteriormente ou posteriormente à data da IN, esta modificação deverá atender à ENCE de maior classe, visto que podem ocorrer casos de inviabilidade técnica ou econômica.

Portanto, o trabalho não tem por objetivo direto a obtenção da etiqueta do prédio em análise, mas sim, o levantamento de dados através de simulações computacionais, levando em conta a situação atual e a análise de possíveis melhorias. As informações obtidas podem ser utilizadas futuramente em uma provável auditoria energética da edificação, visando à classificação energética em relação ao PBE edifica.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho termoenergético do prédio administrativo da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete, através de simulação computacional utilizando o *software* EnergyPlus. Como objetivos específicos destacam-se:

- Obter via simulação as potências de refrigeração e aquecimento necessárias para atingir a temperatura de *setpoint* do ar condicionado em cada zona térmica através do modo *Ideal Loads Air System*;
- Simular empregando o sistema *Split* instalado atualmente, com intuito de verificar o conforto térmico das zonas climatizadas e o consumo total de energia elétrica do prédio;
- Confrontar as potências obtidas via *software*, com as potências instaladas;
- Propor um sistema de ar condicionado mais eficiente, tal como o VRF, empregando melhorias na envoltória da edificação, a fim de reduzir a carga térmica e melhorar os parâmetros de conforto térmico;
- Comparar o consumo de energia elétrica de toda a edificação e dos sistemas de climatização, aquecimento e ventilação, para o caso base e o sistema proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta trabalhos relacionados a simulação termoenergética, avaliação do conforto térmico e redução do consumo de energia elétrica, com objetivos e metodologias semelhantes aos que estão sendo desenvolvidos, servindo como base para o presente trabalho.

2.1 Trabalhos Relacionados

Baltar (2006) avaliou a influência de parâmetros construtivos na carga térmica de um hospital, objetivando o conforto térmico e a redução do consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar. As entradas analisadas incluem os tipos de vidros, cores externas das fachadas e revestimentos das paredes internas, sendo a simulação realizada através do *software* EnergyPlus. As características construtivas que obtiveram os melhores resultados são: vidros duplos, revestimento interno com poliestireno expandido (EPS) de 60mm com gesso acartonado e pintura externa na cor branca. Se estas melhorias fossem implantadas, iriam resultar na redução de 13,6% do consumo anual de energia elétrica.

Em sua dissertação, Carotenuto (2009) avaliou o desempenho termoenergético de um prédio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul construído em 1926, o qual possui elevada inércia térmica. Para o desenvolvimento do trabalho foi empregado o *software* EnergyPlus, versão 2.2, sendo a simulação realizada para 14 dias de projeto e utilizando o arquivo climático da cidade de Porto Alegre. A edificação foi separada em 69 zonas térmicas, nas quais 39 eram atendidas pelo sistema de climatização. O sistema de ar condicionado proposto foi o de Vazão de Refrigerante Variável (VRF), para o qual foram obtidas as potências de refrigeração e aquecimento para se atender a temperatura do termostato das zonas térmicas. As potências das máquinas externas foram correlacionadas com as curvas de desempenho de um fabricante, com intuito de reproduzir o desempenho de um sistema real em relação às condições termodinâmicas externas e internas dos ambientes. Também são avaliadas as condições de conforto térmico, onde grande parte das zonas atendidas pelo sistema de ar condicionado contemplam os parâmetros de conforto para o verão. Por fim, é apresentado o consumo anual de energia elétrica da edificação, onde os equipamentos representam em torno de 42% do consumo total, seguido pelos sistemas de iluminação e ar condicionado, com parcelas de 30,3% e 27,7%, respectivamente.

Stein (2011) realizou uma análise termoenergética de uma edificação localizada na cidade de Porto Alegre através do *software* EnergyPlus, a qual foi segmentada em 33 zonas térmicas, sendo 21 climatizadas. Com isso, propôs a alteração dos vidros simples por vidros duplos, um melhor controle da iluminação natural e a substituição do sistema de climatização de água gelada (*Chiller*) instalado atualmente por um do tipo VRF. Portanto, obteve-se uma redução no consumo total de energia elétrica da edificação de 37,02% e de 62,98% para somente o sistema de climatização.

Brasiliense (2012) avaliou a eficiência termoenergética de um projeto de uma edificação comercial que irá ser construída, analisando o consumo energético dos sistemas de iluminação e climatização, propondo alternativas para a configuração destes sistemas. Para a realização do trabalho, foram empregados os *softwares* EnergyPlus e Google SketchUp com o *plug-in* OpenStudio. Foi proposto um sistema interno de controle de iluminação que acarretou na redução da carga térmica dos ambientes, juntamente com uma queda de 11,4% no consumo de energia elétrica quando comparado ao projeto anterior. Em relação à climatização, foi sugerido um sistema de refrigeração por fluxo de refrigerante variável (VRF), que representou uma diminuição de 45% no consumo de energia quando comparado ao sistema do projeto base, onde seria empregado um sistema de expansão indireta (água gelada) através de *Chillers*.

Müller (2013) elaborou a avaliação da eficiência energética do projeto de um prédio universitário a ser construído, visando propor melhorias. A metodologia empregada baseou-se no *software* Google SketchUp com o *plug-in* OpenStudio para obtenção do desenho tridimensional da edificação, sendo a simulação executada no EnergyPlus empregando um sistema de ar condicionado do tipo *Split*. Dentre as alterações, destacam-se o sistema de controle de iluminação e o emprego de vidros duplos com uma película no vidro externo. Com as modificações propostas, obteve-se uma redução de 22,5% no consumo total de energia da edificação e uma diminuição de 50% para o sistema de refrigeração.

Taube (2017) em seu trabalho de conclusão de curso avaliou a eficiência termoenergética de um prédio através do *software* EnergyPlus, o qual foi segmentado em 27 zonas térmicas, das quais 9 são climatizadas. Foi avaliado o sistema de ar condicionado *Split* instalado atualmente, onde constatou-se que a potência de refrigeração instalada está em média 21% acima da potência necessária. Com intuito de reduzir o consumo de energia elétrica, foi proposta a substituição do sistema de climatização atual por um do tipo VRF, que acarretou uma redução de aproximadamente 39,8% no consumo anual de energia elétrica para o sistema de ar condicionado. Também foi verificado o conforto térmico de duas zonas térmicas para o novo sistema, as quais não atendiam a temperatura operativa de conforto, visto que a edificação não contava com cortinas, o que ocasionava um aumento da temperatura média radiante.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, serão apresentados termos pertinentes ao entendimento do trabalho, como eficiência energética, carga térmica e conforto térmico, juntamente com o equacionamento empregado pelo *software* EnergyPlus referente aos balanços de energia na zona térmica.

3.1 Definições

Os termos descritos nesta subseção têm por finalidade fortalecer o embasamento teórico e facilitar a interação entre o leitor e o trabalho.

3.1.1 Eficiência Energética

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2010), o uso eficiente da energia ganhou visibilidade devido à crise do Petróleo nos anos setenta, quando notou-se que o uso de

combustíveis fósseis geraria o aumento de custos, desde o lado econômico até o lado ambiental. Com isso, equipamentos e hábitos de consumo começaram a ser analisados, evidenciando que medidas que proporcionam eficiência energética são rentáveis, visto que o custo de implantação é inferior ao custo para produzir ou adquirir energia. Outro ponto que deve ser considerado são as alterações climáticas decorrentes do aquecimento global, que ressaltam ainda mais a importância desse tema.

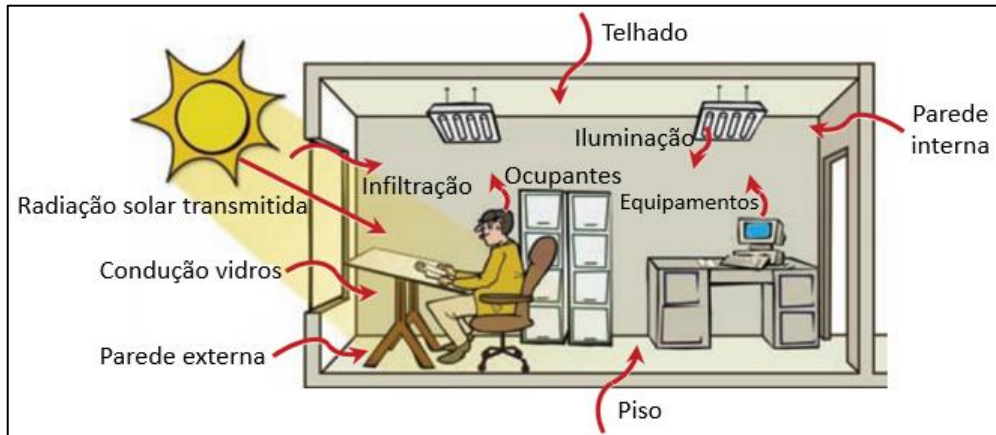
A EPE (2010, p.4) diz que “eficiência está associada à quantidade efetiva de energia utilizada e não à quantidade mínima teoricamente necessária para realizar um serviço”. Já para eficiência energética em edificações, de acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o conceito está associado a promover conforto térmico, visual e auditivo a seus ocupantes, empregando menor consumo de energia. Logo, constata-se que um projeto realizado de forma adequada conforme a região climática, levando em conta meios naturais de climatização e iluminação, acaba por gerar uma redução nos gastos com energia. Segundo Viana et al. (2012), para promover a eficiência energética, deve-se levar em consideração conceitos de engenharia, economia e administração, apresentando métodos e ações que favoreçam o desempenho energético, minimizando as perdas.

Para o Ministério do Meio Ambiente (2014), prédios públicos dispõem de diversas oportunidades de reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência energética da edificação, podendo ser através da utilização de equipamentos mais eficientes e modificações na envoltória da construção.

3.1.2 Carga Térmica

A carga térmica, segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), é a quantidade calor sensível e latente que deve ser retirado ou adicionado ao ambiente para que este se mantenha em condições desejáveis de temperatura e umidade. É de suma importância para o dimensionamento adequado de um sistema de ar condicionado, pois determina valores importantíssimos para a seleção das máquinas, como as potências de refrigeração e aquecimento e a vazão. A carga térmica é dividida em cargas internas e cargas externas, como pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Carga térmica



Fonte: adaptado de TRANE (2011).

As cargas externas podem ser oriundas das seguintes fontes:

- Radiação solar que incide sobre as superfícies como paredes externas e telhados;
- Radiação solar transmitida através das janelas;
- Transmissão de calor através das superfícies sem insolação como paredes, pisos, tetos, portas e janelas, devido à diferença de temperatura entre a zona climatizada e o meio externo ou zonas adjacentes não climatizadas;
- Infiltrações, que contribuem com calor sensível e latente, visto que o ar se trata de uma mistura que conta com vapor de água.

Já as cargas internas são segmentadas em:

- ✓ Calor dissipado pelo sistema de iluminação;
- ✓ Calor liberado pelos ocupantes da zona térmica, sendo a temperatura corporal responsável pela dissipação de calor sensível e calor latente devido à transpiração e à respiração;
- ✓ Dissipação de calor através dos equipamentos como computadores e monitores.

3.1.3 Conforto Térmico

Conforme a ASHRAE (2013), a principal função de um sistema de ar condicionado é proporcionar conforto térmico aos seus usuários. O conforto é ligado diretamente a uma condição mental do ocupante em expressar satisfação com o ambiente térmico. Porém, esta condição ou avaliação de bem-estar varia de pessoa para pessoa, visto que elas são dependentes de diversos fatores influenciados por questões físicas, fisiológicas e psicológicas. O conforto térmico é atingido quando a umidade da pele é baixa e as temperaturas são mantidas dentro de

um pequeno intervalo, reduzindo os esforços fisiológicos na readequação das mesmas, fazendo com que o balanço de todas as trocas térmicas a que o corpo humano está submetido seja nulo.

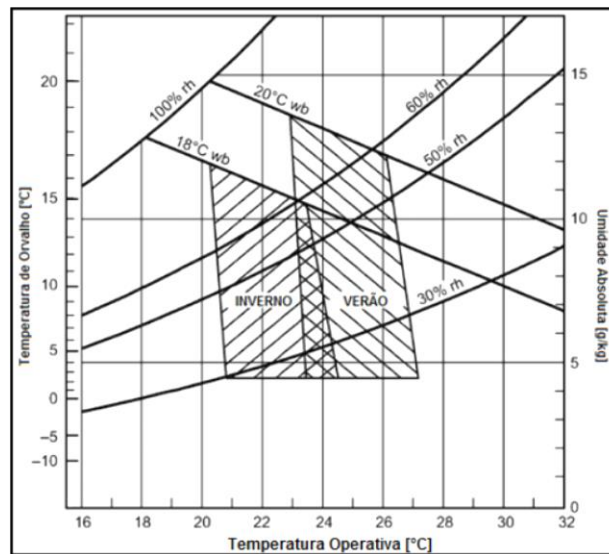
Para Frota e Schiffer (2001), o corpo humano funciona simplificadamente semelhante a uma máquina térmica, produzindo calor conforme sua atividade, devendo este ser liberado para que a temperatura corporal se mantenha na casa dos 37°C. Se as trocas de calor entre o ambiente e o corpo são realizadas sem esforço o conforto térmico é obtido, caso contrário, sensações de frio ou calor provenientes da dificuldade em manter a temperatura demandam um esforço adicional, que acaba por limitar a capacidade do ser humano, podendo até incapacitá-lo para o trabalho ou causar problemas de saúde.

Para a avaliação do conforto térmico de um ambiente climatizado devem ser levados em consideração parâmetros que podem ser medidos diretamente, como é o caso da temperatura média do ar e a umidade relativa, e parâmetros calculados, tais como temperatura média radiante e temperatura operativa.

Define-se temperatura média radiante como a temperatura uniforme da superfície de uma envoltória fictícia, onde a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no ambiente real não uniforme, ou seja, trata-se da temperatura das superfícies como piso, paredes e teto. Já a temperatura operativa é obtida pela média entre a temperatura média do ar e radiante ponderada pelos respectivos coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação, visto que um ser humano efetua constantemente trocas de calor sensível por radiação e convecção, sendo essa temperatura de grande relevância para análise do conforto térmico de um ambiente.

Sabendo que o sistema de climatização tem capacidade de controlar somente a temperatura média do ar, torna-se necessário realizar mudanças na configuração da envoltória da edificação para que se obtenha os demais parâmetros dentro da faixa admissível de conforto térmico. Tal intervalo aceitável para a temperatura operativa, tanto no inverno quanto no verão, pode ser definido através do gráfico exibido na Figura 2, o qual conta com dados estimados para pessoas trajando roupas típicas das estações do ano e com atividade física do tipo sedentária.

Figura 2 - Zona de conforto térmico para verão e inverno



Fonte: adaptado de ASHRAE (2005).

Avaliando o centro das regiões de conforto térmico para verão e inverno, considera-se a temperatura média do ar para conforto no verão de 24,5°C e no inverno de 22°C. A NBR 16401-2 recomenda uma faixa entre 65% e 35% de umidade relativa para o verão, e de 60% a 30% no inverno.

Outra forma de avaliar o conforto térmico é através do Voto Médio Preditado (PMV). Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o PMV trata-se de um valor numérico que representa a sensibilidade humana em relação ao frio e ao calor, que engloba variáveis ambientais como temperatura média radiante, velocidade do ar, umidade relativa e temperatura média do ar, considerando também a atividade física e a vestimenta. Através de pesquisas realizadas por Fanger em 1972, o qual avaliou pessoas com diferentes nacionalidades, sexos e idades, pode-se chegar a uma equação para o PMV para diferentes condições ambientais.

O PMV possui um intervalo de variação que vai de +3 a -3, onde +3 representa sensação térmica de muito calor e -3 sensação térmica de muito frio. O ponto ideal de conforto térmico seria PMV igual a 0, porém tal situação possui grande complexidade para ser atingida, visto que a equação depende de diversos fatores. Então, a NBR 16401-2 recomenda valores entre +0,5 e -0,5, os quais são considerados valores aceitáveis de conforto térmico.

3.2 Equacionamento

Nesta etapa, serão apresentados os equacionamentos obtidos através da modelagem dos ambientes segundo o manual de engenharia do *software* EnergyPlus (2016), itens importantes para o entendimento da simulação da edificação em análise.

3.2.1 Equação do Balanço de Energia da Zona Térmica

O balanço de energia na zona térmica é representado através de uma equação diferencial ordinária, sendo a temperatura no volume de controle variante com o tempo, porém constante em toda a sua extensão. Cada zona térmica possui suas características, sendo tratada individualmente, logo a expressão geral é apresentada na equação 1.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_{si} A_{si} (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

onde:

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é o somatório das cargas convectivas internas, [W];

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_{si} A_{si} (T_{si} - T_z)$ é o somatório das transferências de calor para a zona através das superfícies, [W];

h_{si} é o coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície i da zona térmica, [W/m².K];

A_{si} é a área da superfície i da zona térmica, [m²];

T_{si} é a temperatura da superfície i da zona térmica, [°C];

T_z é a temperatura média do ar da zona térmica em análise, [°C];

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor para a zona proveniente da infiltração de ar externo, [W];

\dot{m}_{inf} é a vazão mássica do ar que infiltra na zona térmica, [kg/s];

C_p é o calor específico de ar, [J/kg.K];

T_{∞} é a temperatura ambiente do ar exterior, [°C];

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é o somatório da transferência de calor devido à troca de infiltrações entre as zonas, [W];

\dot{m}_i é a vazão mássica de ar da zona i , [kg/s]

T_{zi} é a temperatura média do ar da zona i ou zona adjacente, [°C];

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia armazenada no ar da zona térmica, [W].

A potência fornecida pelo sistema de refrigeração responsável por atender a carga térmica da zona é representada pela equação 2, sendo seu valor expresso em Watt.

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (2)$$

onde:

\dot{m}_{sys} é a vazão mássica que adentra a zona térmica proveniente do sistema de ar condicionado, [kg/s];

T_{sup} é a temperatura do ar insuflado pelo sistema de ar condicionado, [°C].

A capacitância térmica do ar da zona térmica é mostrada na equação 3, dada em Joule por Kelvin.

$$C_z = \rho_{air} C_p C_T \quad (3)$$

onde:

ρ_{air} é a densidade do ar da zona térmica, [kg/m³];

C_T é o multiplicador da capacidade de calor sensível da zona térmica.

3.2.2 Transferência de Calor por Condução Através das Paredes

As trocas de calor através da envoltória da edificação são um dos principais elementos que devem ser considerados para o correto dimensionamento do sistema de climatização. Sabendo que modelos que envolvem condução em regime transiente são de difícil resolução, os *softwares* tornam-se bons aliados neste processo, sendo de grande valia para a determinação da carga térmica e análise termoenergética.

Para o EnergyPlus, o comportamento transiente dos elementos construtivos é solucionado através de um algoritmo presente na própria ferramenta, onde as funções de transferência por condução (CTF) são aproximadas através de séries temporais, onde o fluxo de calor é relacionado com uma série infinita de temperaturas nos dois lados da superfície, como mostrado na equação 4.

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (4)$$

onde:

$q''_{ko}(t)$ é o fluxo de calor por condução do exterior através do elemento construtivo, [W/m²];

T é a temperatura da superfície, [°C];

i é o subscrito que representa a parte interna do elemento construtivo;

o é o subscrito que representa a parte externa do elemento construtivo;

t é o passo de tempo atual, [s];

X e Y são os fatores de resposta.

A solução da equação 4 é apresentada nas equações 5 e 6, para o fluxo interno e externo de calor, respectivamente.

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (5)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (6)$$

onde:

q''_{ki} é o fluxo de calor na parte interna da superfície do elemento construtivo, [W/m²];

X_j é o fator de resposta externo da CFT, $j=0,1\dots nz$;

Y_j é o fator de resposta cruzado da CFT, $j=0,1\dots nz$;

Z_j é o fator de resposta interno da CFT, $j=0,1\dots nz$;

ϕ_j é o coeficiente do fluxo de calor da CFT, $j=1,2\dots nq$;

T_i é a temperatura da face interna da superfície do elemento construtivo, [°C];

T_o é a temperatura da face externa da superfície do elemento construtivo, [°C];

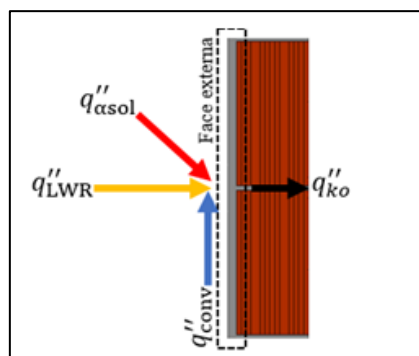
$T_{i,t-j\delta}$ é a temperatura da face interna da superfície no passo de tempo anterior, [°C];

$T_{o,t-j\delta}$ é a temperatura da face externa da superfície no passo de tempo anterior, [°C].

3.2.3 Balanço de Energia nas Superfícies Externas

O presente balanço consiste no somatório de todas as parcelas de energia que incidem e deixam as superfícies externas, conforme apresentado na Figura 3, sendo a expressão mostrada na equação 7.

Figura 3 - Balanço de energia nas superfícies externas



$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (7)$$

onde:

q''_{asol} é o fluxo de radiação solar direta e difusa absorvida com onda curta, [W/m²]. Depende da localização, da inclinação da superfície, das propriedades do material da superfície, condições climáticas, etc;

q''_{conv} é o fluxo de calor devido a troca de calor por convecção entre a superfície e o meio externo, [W/m²];

q''_{ko} é o fluxo de calor por condução na face externa da parede, [W/m²].

q''_{LWR} é o fluxo líquido de energia radiante trocado com o meio e as superfícies em volta com onda longa, [W/m²]. Inclui as trocas de calor entre a superfície externa da parede, o céu e o solo.

As propriedades necessárias para o cálculo do fluxo líquido de energia radiante são complexas, pois dependem de variáveis como temperatura, ângulo e comprimento de onda para cada superfície. Visto isso, aplicam-se as seguintes simplificações:

- Cada superfície emite ou reflete difusamente e é considerada cinza e opaca ($\alpha=\varepsilon$, $\tau=0$, $\rho=1-\varepsilon$);
- Cada superfície possui temperatura uniforme;
- O fluxo que deixa a superfície é uniforme;
- A cavidade de troca de energia radiante não é o meio participante.

Considerando as hipóteses descritas anteriormente, tem-se a equação 8.

$$q''_{LWR} = q''_{gnd} + q''_{sky} + q''_{air} \quad (8)$$

onde:

q''_{gnd} é o fluxo de energia radiante entre a superfície da zona térmica e o solo, [W/m²];

q''_{sky} é o fluxo de energia radiante entre a superfície da zona térmica e o céu, [W/m²];

q''_{air} é o fluxo de energia radiante entre a superfície da zona térmica e o ar, [W/m²].

Aplicando a Lei de Stefan-Boltzmann para a equação 8, obtém-se a equação 9.

$$q''_{LWR} = \varepsilon\sigma F_{gnd}(T_{surf}^4 - T_{gnd}^4) + \varepsilon\sigma F_{sky}(T_{surf}^4 - T_{sky}^4) + \varepsilon\sigma F_{air}(T_{surf}^4 - T_{air}^4) \quad (9)$$

onde:

ε é a emissividade da superfície para onda longa, [adimensional];

σ é a constante de Stefan-Boltzmann, [W/m².K⁴];

F_{gnd} é o fator de forma entre a superfície da parede e a superfície do solo, [adimensional];

T_{surf} é a temperatura da superfície externa da zona térmica, [K];

T_{gnd} é a temperatura do solo, [K];

F_{sky} é o fator de forma entre a superfície da parede e o céu, [adimensional];

T_{sky} é a temperatura do céu, [K];

F_{air} é o fator de forma entre a superfície da parede e o ar, [adimensional];

T_{air} é a temperatura do ar, [K].

Para que haja compatibilidade entre as equações da energia radiante e o balanço de energia, são linearizados os coeficientes de transferência de calor por radiação, conforme equação 10.

$$q''_{LWR} = h_{r,gnd}(T_{gnd} - T_{surf}) + h_{r,sky}(T_{sky} - T_{surf}) + h_{r,air}(T_{air} - T_{surf}) \quad (10)$$

$$h_{r,gnd} = \frac{\varepsilon\sigma F_{gnd}(T_{surf}^4 - T_{gnd}^4)}{T_{surf} - T_{gnd}} \quad (11)$$

$$h_{r,sky} = \frac{\varepsilon\sigma F_{sky}(T_{surf}^4 - T_{sky}^4)}{T_{surf} - T_{sky}} \quad (12)$$

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon\sigma F_{air}(T_{surf}^4 - T_{air}^4)}{T_{surf} - T_{air}} \quad (13)$$

onde:

$h_{r,gnd}$ é o coeficiente de transferência de calor por radiação do solo linearizado, [W/m².K];

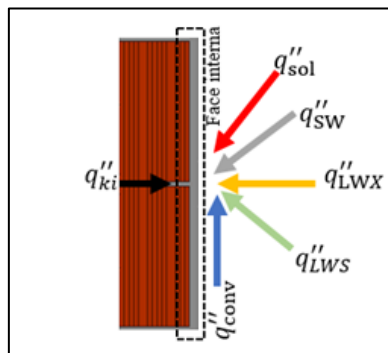
$h_{r,sky}$ é o coeficiente de transferência de calor por radiação do céu linearizado, [W/m².K];

$h_{r,air}$ é o coeficiente de transferência de calor por radiação do ar linearizado, [W/m².K].

3.2.4 Balanço de Energia nas Superfícies Internas

Esse balanço de energia é modelado conforme quatro componentes: condução através do elemento construtivo, convecção com o ar, absorção e reflexão de radiação de onda curta e troca de calor radiante de onda longa. A radiação de onda curta está associada a radiação solar que é transmitida através das superfícies translúcidas, ou também a produzida pelo sistema de iluminação. Em relação às ondas longas, destacam-se como fonte a radiação de baixa temperatura, como a emitida pelos ocupantes ou pelos equipamentos. O balanço de energia é ilustrado na Figura 4 e representado pela equação 14 a seguir.

Figura 4 - Balanço de energia nas superfícies internas



$$q''_{LWX} + q''_{sw} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv,i} = 0 \quad (14)$$

onde:

q''_{LWX} é o fluxo líquido de energia radiante de onda longa trocado entre as superfícies, [W/m²];

q''_{SW} é o fluxo líquido de energia radiante de ondas curtas trocado entre a superfície e o sistema de iluminação, [W/m²];

q''_{LWS} é o fluxo de energia radiante de onda longa trocado entre a superfície e os equipamentos, [W/m²];

q''_{ki} é o fluxo de calor por condução na face interna da parede, [W/m²];

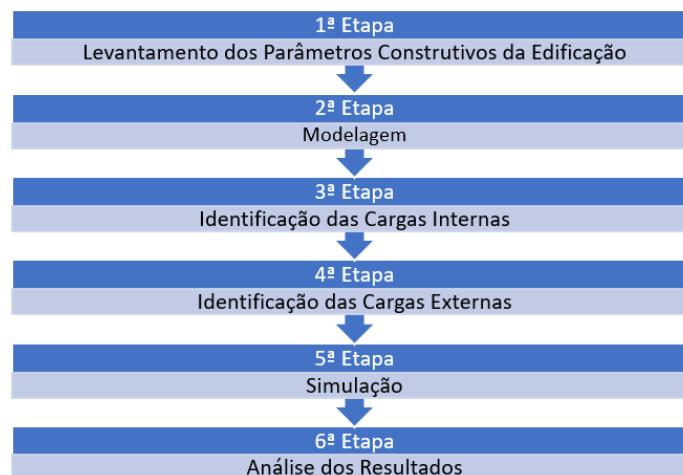
q''_{sol} é o fluxo de energia por radiação solar transmitida e absorvida pela superfície, [W/m²];

$q''_{conv,i}$ é o fluxo de calor por convecção do ar da zona [W/m²].

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada na realização do trabalho é composta de 6 etapas, conforme exibido na Figura 5.

Figura 5 - Etapas da metodologia



A seguir, são descritas detalhadamente todas as etapas do trabalho.

1ª Etapa – Nesta primeira etapa são levantados os parâmetros construtivos da edificação com auxílio da planta baixa, do memorial descritivo, do projeto estrutural, de imagens e através de visitas ao prédio. Com isso, são determinadas as características geométricas e visuais das superfícies: espessuras e cores; as propriedades termofísicas dos materiais empregados na construção: condutividade térmica, densidade e calor específico; as propriedades ópticas dos vidros e a geometria das superfícies de sombreamento, tais como os brises posicionados em frente às janelas e as propriedades das cortinas utilizadas.

2ª Etapa – Dando sequência ao trabalho, realiza-se a modelagem da edificação empregando o *software* SketchUp juntamente com o *plug-in* OpenStudio, criando um modelo tridimensional do prédio, visto que as devidas dimensões já haviam sido determinadas na etapa

anterior. Simultaneamente é feito o zoneamento térmico, que diz respeito a segmentar o modelo em diversos volumes fixos, delimitados por suas superfícies, ou seja, cada sala do prédio equivale a uma zona térmica composta por superfícies como: piso, paredes, janelas, portas e forro.

3ª Etapa – Através de visitas e pesquisas realizadas juntamente com os profissionais que trabalham na edificação, chegou-se ao número de ocupantes, horário de funcionamento e os equipamentos presentes em cada sala. A potência de iluminação foi determinada pela análise do projeto elétrico do prédio.

4ª Etapa – As cargas externas foram determinadas através da seleção dos dias de projeto utilizando o arquivo climático da região, definindo os parâmetros relacionados à temperatura externa, velocidade e direção do vento, umidade e radiação solar, necessários para que sejam executadas as simulações. Por fim, são estimadas as infiltrações de ar em cada zona térmica.

5ª Etapa – Com o modelo tridimensional construído, as propriedades dos materiais definidas e as cargas internas e externas devidamente determinadas, são inseridos os dados no *software* EnergyPlus para que sejam executadas as simulações. Ao total foram realizadas 4 simulações, descritas a seguir.

1. Simulação para a obtenção das potências ideais de refrigeração e aquecimento necessárias para atender o *setpoint* de temperatura média do ar de cada zona térmica;
2. Simulação empregando as máquinas de ar condicionado instaladas na edificação, resultando no consumo total de energia elétrica e os parâmetros de conforto térmico atuais;
3. Simulação com mudanças na envoltória da edificação, obtendo novas potências ideais de refrigeração e aquecimento;
4. Por fim, é feita uma simulação com a nova configuração da envoltória e o sistema de ar condicionado VRF, tendo em vista o novo consumo de energia elétrica e os novos parâmetros relacionados ao conforto térmico.

6ª Etapa – Com os resultados obtidos após as 4 simulações, são feitas comparações entre as potências ideais de refrigeração e aquecimento obtidas via *software* e as potências das máquinas instaladas. Na sequência, são averiguadas as condições atuais de conforto térmico da edificação, vendo se estas atendem os requisitos mínimos descritos nas normas. Por fim, são comparados os consumos de energia elétrica entre o caso base e o caso proposto, verificando também o conforto térmico da edificação com as modificações na envoltória e com o novo sistema de ar condicionado.

4.1 Ferramentas Computacionais

Nesta subseção são descritos os *softwares* utilizados durante o trabalho, desde a obtenção dos dados até a simulação.

4.1.1 AutoCAD

AutoCAD é um *software* do tipo desenho assistido por computador, criado e comercializado pela Autodesk, Inc.®, a partir de 1982. É amplamente empregado na criação de desenho técnico 2D e modelos tridimensionais, e nos ramos da arquitetura e engenharia. No presente trabalho é utilizada a versão estudante 2017, auxiliando na manipulação da planta baixa, projeto estrutural, planta elétrica e projeto de climatização da edificação em análise.

4.1.2 SketchUp

Trata-se de um *software* de desenho assistido por computador, lançado no mercado no ano de 2000 pela empresa @Last Software®. É uma das ferramentas que propicia maior facilidade na concepção, criação e desenvolvimento de modelos 3D. Neste estudo, utiliza-se o *software* para a modelagem tridimensional da edificação, com a versão 8.0.14346 de 2010, disponibilizada gratuitamente para *download*.

4.1.3 OpenStudio

É um *plug-in* desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) para o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), que possibilita a criação das zonas térmicas e suas superfícies (paredes, piso, forro, janelas e portas) utilizando as ferramentas do SketchUp, fazendo a interface entre o *software* de desenho e o *software* utilizado para simulação EnergyPlus. Para a execução do trabalho aplicou-se a versão 1.0.14, compatível com os demais *softwares* e disponível gratuitamente para *download* no *site* do DOE.

4.1.4 EnergyPlus

O EnergyPlus é um *software* financiado pelo DOE e gerido pelo NREL, utilizado para a execução de análises termoenergéticas. O programa recebe os dados geométricos da

edificação através do *plug-in* OpenStudio, e então são definidos os parâmetros de entrada como: características construtivas das superfícies, posicionamento geográfico, condições climáticas da região, as cargas internas (iluminação, ocupação e equipamentos) e infiltrações. Posteriormente, o *software* possibilita realizar simulações empregando diversos tipos de sistemas de ar condicionado, tendo como variáveis de saída diversos dados pertinentes ao estudo, tais como a temperatura média do ar da zona térmica e o PMV, e os consumos de energia elétrica dos sistemas de refrigeração, aquecimento, ventilação, iluminação, entre outros. O EnergyPlus mostra-se uma ferramenta fundamental na análise de possibilidades de se obter melhores condições de conforto térmico, com o menor consumo de energia elétrica.

5 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A presente seção visa detalhar a edificação em análise, apresentando informações gerais do prédio e demonstrando como foi realizado o zoneamento térmico. Na sequência, são especificadas as propriedades das superfícies, as cargas internas e as cargas externas que compõem a carga térmica das zonas.

5.1 Edificação – Prédio Administrativo

A edificação que será analisada no presente trabalho, trata-se do prédio administrativo da Universidade Federal do Pampa, localizada na cidade de Alegrete – RS e situada na Avenida Tiarajú, nº 810, bairro Ibirapuitã. O prédio pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Prédio administrativo da UNIPAMPA campus Alegrete



Uma vista aérea do prédio administrativo e seu norte geográfico podem ser visualizados na Figura 7.

Figura 7 - Vista aérea da edificação



Fonte: adaptado de Google (2018).

A Tabela 1 apresenta a localização geográfica da edificação e outras informações pertinentes ao estudo.

Tabela 1 - Localização geográfica da edificação

Prédio Administrativo da Universidade Federal do Pampa – Alegrete – RS	
Latitude	29°47'22,1'' Sul
Longitude	55°46'07,9'' Oeste
Fuso Horário	-3
Elevação	90 metros

Fonte: Google (2018).

A edificação é constituída de 3 pavimentos, sendo o térreo composto de uma área de circulação, 4 banheiros, biblioteca, sala administrativa, secretaria acadêmica, arquivo, copa, sala de micrografia, secretaria de pós-graduação e duas salas de apoio estudantil. O segundo pavimento possui 10 salas de professores, uma circulação, 4 banheiros, recepção, sala da direção, sala de reuniões, sala do Setor de Tecnologia da Informação e Comunicação (STIC) e secretaria administrativa. Já o terceiro pavimento contém 17 salas de professores, uma circulação e 4 banheiros. Portanto, o prédio possui uma área construída de aproximadamente 2757,73 m², onde os pavimentos possuem pé direito de 3,50 metros. O Anexo 1 apresenta a planta baixa dos três pavimentos e da cobertura, juntamente com as vistas em corte da edificação.

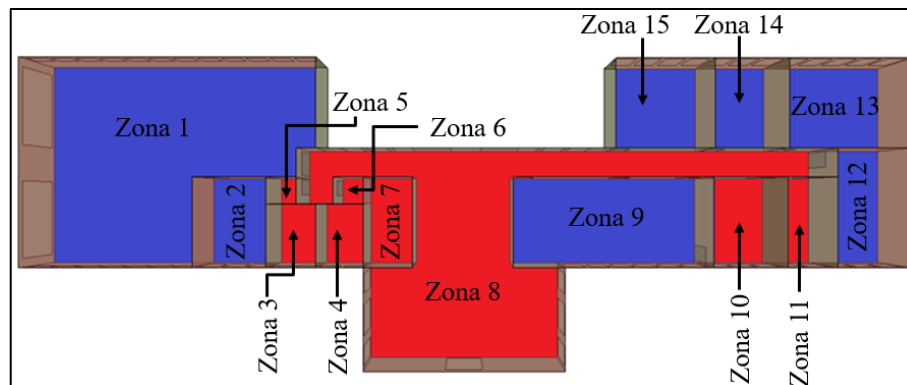
5.2 Zoneamento Térmico

Para a realização da simulação computacional, a edificação deve ser segmentada em zonas térmicas, as quais dizem respeito a volumes de ar a temperatura uniforme, delimitados por superfícies que realizam trocas de calor, como as paredes, pisos, tetos, janelas e portas. No

presente trabalho, o prédio foi dividido em 66 zonas térmicas, englobando os 3 pavimentos e o telhado, apresentando 587 superfícies, divididas entre paredes, tetos e pisos, e 452 superfícies que representam portas e janelas. O Apêndice A apresenta um quadro com a descrição e o respectivo número de cada uma das zonas térmicas que compõem o prédio.

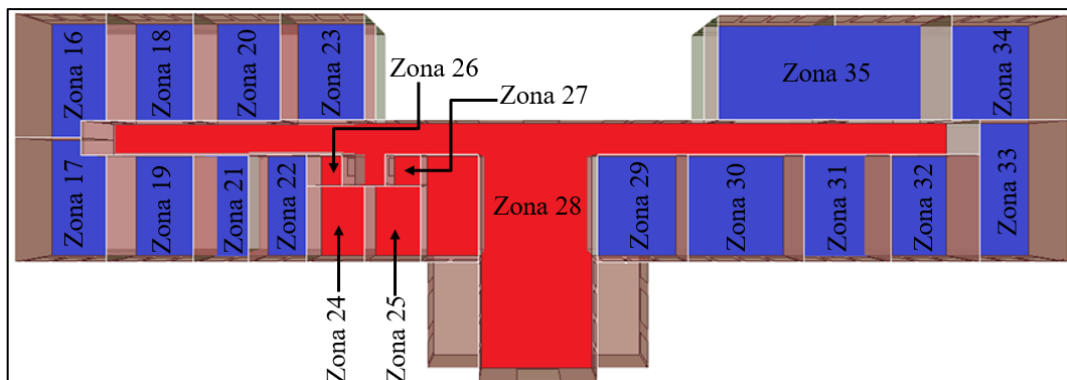
O térreo foi decomposto conforme exibido na Figura 8, onde as áreas em azul representam as zonas climatizadas e em vermelho as zonas com evolução livre da temperatura.

Figura 8 - Zoneamento térmico do térreo



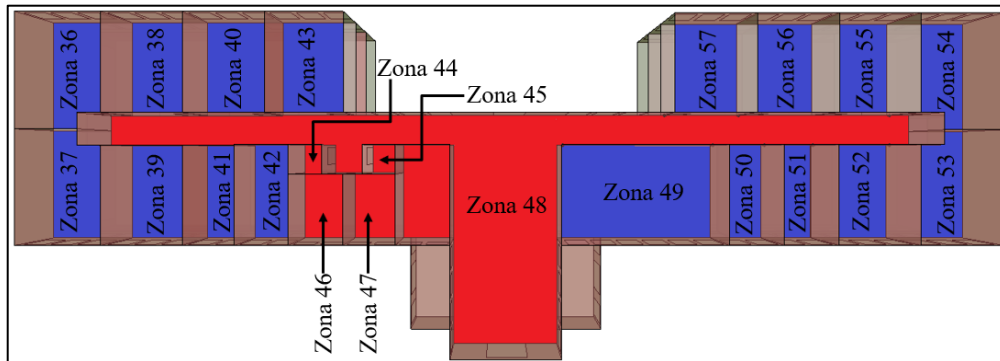
Para o térreo, tem-se 15 zonas térmicas, das quais 7 são climatizadas e 8 possuem evolução livre da temperatura. A Zona 7 representa o volume onde estariam localizadas as escadas. Com o objetivo de simplificar o modelo tridimensional, esta zona terá uma altura que se estenderá do térreo até o terceiro pavimento. Tal simplificação não representa grandes mudanças, visto que se trata de uma zona não climatizada. Em relação ao segundo pavimento, este possui 20 zonas térmicas, sendo 15 climatizadas e 5 com evolução livre da temperatura, como pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 - Zoneamento térmico do segundo pavimento



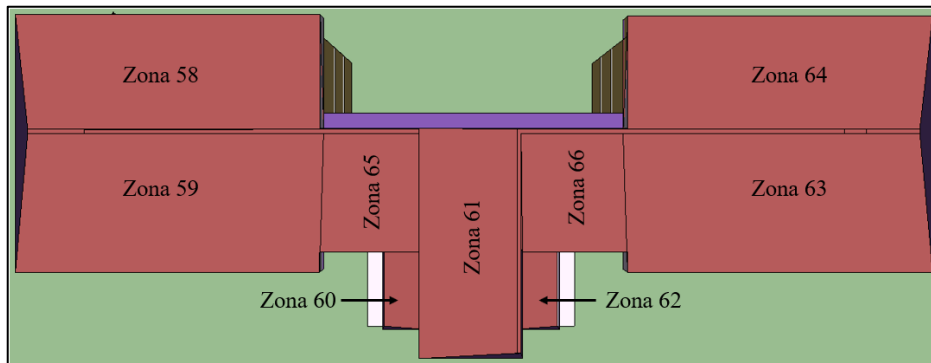
O terceiro pavimento é constituído de 22 zonas térmicas, sendo 17 climatizadas e 5 com evolução livre da temperatura, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Zoneamento térmico do terceiro pavimento



A Figura 11, demonstra o zoneamento térmico da cobertura da edificação, sabendo que devem ser consideradas estas zonas, pois existe um volume de ar entre o telhado e o forro do terceiro pavimento.

Figura 11 - Zoneamento térmico da cobertura



A cobertura apresenta 9 zonas térmicas. Portanto, a edificação apresenta 39 zonas climatizadas e 27 zonas com evolução livre de temperatura.

Através do *software* SketchUp foi construído o modelo tridimensional da edificação, prezando para que este possuísse características geométricas o mais próximas possível das da construção real. As imagens a seguir apresentam comparações entre o modelo tridimensional e o prédio, como pode ser visualizado na Figura 12, que exibe a fachada oeste da edificação.

Figura 12 - Fachada oeste



Uma comparação entre fotos da edificação e o modelo tridimensional para a fachada leste é mostrada na Figura 13.

Figura 13 - Fachada leste



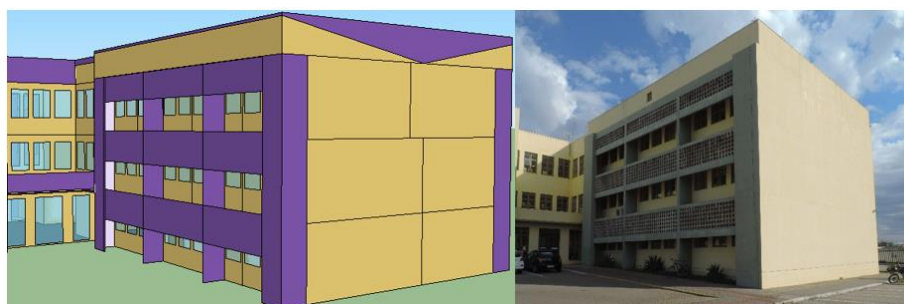
A fachada sul é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Fachada sul



A Figura 15 mostra a comparação vista a partir da fachada norte.

Figura 15 - Fachada norte



5.3 Elementos Construtivos da Edificação

As propriedades termofísicas dos materiais que compõem todas as superfícies das zonas térmicas, como pisos, paredes, portas, forros e telhados são mostradas na Tabela 2. Os dados foram obtidos através da NBR 15220-2, Incropera (2008) e Çengel (2009). As paredes são pintadas de cor amarela, com absorvidade visível (α_V) igual a 0,3, já as portas e o piso de tacos de madeira são de cor marrom, com α_V de aproximadamente 0,65.

Tabela 2 - Propriedades termofísicas dos elementos construtivos do prédio

Material	Propriedades Termofísicas						
	e_m [cm]	k_m [W/m.K]	ρ_m [kg/m ³]	$C_{p,m}$ [J/kg.K]	α_t	α_s	α_v
Reboco	2,5	0,72	1860	1000	0,9	0,3	0,3
Tijolo Interno	10	0,9	1500	920	0,93	0,63	0,63
Tijolo Externo	15	0,9	1500	920	0,93	0,63	0,63
Telha de Fibrocimento	0,8	0,95	2000	0,84	0,9	0,7	0,7
Concreto	15	1,75	2300	1000	0,9	0,7	0,7
Brita	8	0,7	1250	800	0,9	0,7	0,7
Solo	50	0,52	2050	1840	0,9	0,75	0,75
Lajota Opaca Escura	1	1,05	2000	920	0,9	0,86	0,86
Argamassa de Assentamento	1	1,15	1950	1000	0,9	0,7	0,7
Cimento de Regularização	4	0,29	750	1000	0,9	0,7	0,7
Madeira de Lei	2	0,29	900	1340	0,9	0,65	0,65
Gesso acartonado	1,5	0,35	875	840	0,9	0,3	0,3
Lã Mineral	5	0,045	110	750	0,9	0,3	0,3
Madeira Compensada	3,5	0,15	450	2300	0,9	0,65	0,65
Lajota Branca	1	1,05	2000	920	0,9	0,2	0,2
Poliestireno Expandido Moldado	16	0,04	25	1420	0,9	0,2	0,2
Lajota Cerâmica	8	0,9	1500	920	0,93	0,63	0,63

Fonte: ABNT (2005), Incropera (2008) e Çengel (2009).

Onde:

e_m é a espessura do material, [cm];

k_m é a condutividade térmica do material, [W/m.K];

ρ_m é a densidade do material, [kg/m³];

$C_{p,m}$ é o calor específico do material, [J/kg.K];

α_t é absortividade da radiação térmica de onda longa na temperatura da superfície em 300 K;

α_s é a absortividade da radiação solar integrado em todo o espectro do comprimento de onda (ultravioleta, visível e infravermelho);

α_v é a absortividade da radiação solar integrada no espectro do comprimento de onda visível;

As características dos vidros foram obtidas através de um banco internacional de dados elaborado por Lawrence Berkeley National Laboratory (2018), o qual é subsidiado pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE) e conta com as propriedades ópticas e físicas de diversos tipos de vidros disponíveis no mercado. Portanto, as propriedades dos vidros das janelas e portas empregadas na edificação, conforme espessuras definidas no memorial descritivo, são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades ópticas e físicas dos vidros empregados na edificação

Tipo de Vidro	Claro monolítico (4mm)	Claro monolítico (5mm)
$e_{m,v}$ [mm]	3,9	4,7
τ_s	0,812	0,793
R_{fs}	0,075	0,074
R_{bs}	0,075	0,074
τ_v	0,895	0,891
R_{fv}	0,086	0,085
R_{bv}	0,086	0,086
τ_{ir}	0	0
ε_f	0,84	0,84
ε_b	0,84	0,84
k [W/m.K]	1	1

Fonte: Lawrence Berkeley National Laboratory (2018).

Onde:

$e_{m,v}$ é a espessura do vidro, [mm];

τ_s é a transmitância solar na direção normal à superfície do vidro integrado sobre toda a faixa do espectro solar;

R_{fs} é a refletância solar na direção normal à superfície externa do vidro integrado em toda a faixa do espectro solar;

R_{bs} é refletância solar na direção normal à superfície interna do vidro integrado a toda a faixa do espectro solar;

τ_v é a transmitância visível na direção normal à superfície do vidro integrado na faixa visível do espectro solar ponderado pela resposta fotópica do olho humano;

R_{fv} é a refletância visível na direção normal à superfície externa do vidro integrado na faixa visível do espectro solar ponderado pela resposta fotópica do olho humano;

R_{bv} é a refletância visível na direção normal à superfície interna do vidro integrado na faixa visível do espectro solar ponderado pela resposta fotópica do olho humano;

τ_{ir} é a transmitância da direção normal à superfície do vidro integrada em toda a faixa do comprimento de onda longa (infravermelho) do espectro solar;

ε_f é a emissividade hemisférica da superfície externa do vidro no infravermelho;

ε_b é a emissividade hemisférica da superfície interna do vidro no infravermelho;

k é a condutividade térmica do vidro, [W/m.K].

A edificação conta com cortinas em todas as zonas climatizadas, sendo as propriedades físicas e ópticas obtidas através do catálogo de um fabricante e mostradas na Tabela 4. Todas as cortinas possuem cor bege e durante as simulações são consideradas fechadas.

Tabela 4 - Propriedades ópticas e físicas da cortina utilizada no prédio

Tecido	τ_s	R_{fs}	τ_v	R_{fv}	ϵ	τ_{ir}	$e_{m,c}$ [mm]	k [W/m.K]	L_{cv} [m]
NATTE 2115	0,21	0,484	0,188	0,484	0,9	0	0,57	0,1	0,15

Fonte: Helioscreen (2012).

Onde:

L_{cv} é distância da cortina em relação ao vidro, [m].

5.4 Cargas Internas

As cargas internas são provenientes do calor dissipado pelo sistema de iluminação, pelos equipamentos e pelas pessoas que ocupam as zonas térmicas, sendo de grande importância para o dimensionamento e seleção de um adequado sistema de ar condicionado.

5.4.1 Iluminação

Segundo o EnergyPlus (2016), o calor dissipado pelas lâmpadas é dividido em quatro parcelas: fração de ar de retorno, fração radiante, fração visível e a fração convectiva que é obtida através da equação 15.

$$f_{conv,i} = 1 - (f_{ar\ de\ retorno} + f_{visível} + f_{radiante,i}) \quad (15)$$

A edificação atualmente possui luminárias suspensas que contam com 2 lâmpadas fluorescentes de 32W cada, sendo a quantidade destas descrita na planta elétrica do prédio. Para este tipo de luminária, o EnergyPlus (2016) recomenda uma fração radiante de 0,32, uma fração visível de 0,23 e uma fração de ar de retorno igual a 0, visto que a luminária não conta com duto de retorno de ar, resultando em uma fração convectiva de 0,45.

5.4.2 Equipamentos Elétricos

O EnergyPlus (2016) define que a contribuição de calor dos equipamentos elétricos para a carga térmica de cada ambiente é segmentada em 4 parcelas: fração latente, fração radiante, fração perdida e a fração convectiva obtida através da equação 16.

$$f_{conv,e} = 1 - (f_{latente} + f_{radiante,e} + f_{perdida}) \quad (16)$$

Para a edificação em análise, a maior parte do calor dissipado pelos equipamentos elétricos é proveniente de computadores e monitores, os quais a ASHRAE (2013) recomenda um ganho de calor de 55W para ambos os equipamentos. Em relação às parcelas, o computador

e o monitor possuem respectivamente 0,15 e 0,4 de fração radiante, resultando em frações convectivas de 0,85 e 0,6, visto que esses não contribuem em forma de calor latente e não produzem trabalho mecânico, possuindo fração perdida nula.

5.4.3 Ocupação

Esta parcela da carga interna é devida ao calor sensível e latente dissipado pelos ocupantes, o qual depende da atividade física (metabolismo) e a quantidade de pessoas presentes no ambiente. Para a ASHRAE (2013), o calor total dissipado por pessoas de ambos os sexos para atividades moderadas de escritório é de 130W, onde 55W é devido ao calor latente e os 75W restantes por calor sensível, o qual possui fração radiante igual a 0,58.

Cada zona térmica possui sua respectiva ocupação, a qual varia conforme as horas do dia. Em questões de simulação, optou-se por padronizar o horário de ocupação das salas climatizadas, sendo para o térreo utilizado o horário das 08:00 às 21:00 horas, visto que esse pavimento conta com a biblioteca e a secretaria acadêmica, que funcionam neste respectivo horário. Para o segundo e terceiro pavimentos, o horário de ocupação é das 08:00 às 20:00 horas, pois estes pavimentos contam com diversas salas de professores. Foi considerado que a edificação não possui ocupação nas salas climatizadas durante os feriados e os finais de semana.

5.5 Cargas Externas

As cargas externas estão associadas com a incidência de radiação solar nas superfícies da edificação e também à diferença entre as temperaturas internas e externas das zonas térmicas, que são obtidas através do arquivo climático e dos respectivos dias de projeto. Outro fator importante é o calor sensível e latente proveniente das infiltrações de ar.

5.5.1 Arquivo Climático e Dias de Projeto

As informações presentes no arquivo climático são usualmente utilizadas para o dimensionamento e seleção dos sistemas de ventilação, aquecimento e ar condicionado e seus respectivos consumos de energia elétrica, incluindo também o consumo dos demais sistemas que compõem a edificação, como o sistema de iluminação e os equipamentos elétricos. Os dados são obtidos através de estações meteorológicas durante um período mínimo de 10 anos. Posteriormente estes são tratados estatisticamente para que se obtenha o ano típico local, ou

seja, os 12 meses que mais representam o clima na região em análise, mostrando valores de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura de ponto de orvalho, conteúdo de umidade, velocidade e direção do vento, para diversas frequências de ocorrência.

Para o presente trabalho será empregado o arquivo climático da cidade de Alegrete-RS, obtido através do banco de dados do LABEEE (2016). Já o dimensionamento do sistema de ar condicionado e a análise de conforto térmico das zonas climatizadas são realizados através dos dias de projetos recomendados pela ASHRAE (2013), para os quais serão utilizados os dados da cidade de Artigas no Uruguai, visto que Alegrete não conta com estas informações. A distância entre as cidades é de aproximadamente 100 km e ambas estão localizadas na mesma região climática, logo, esta aproximação não tem grande influência sobre os resultados obtidos.

As condições externas para verão e inverno são descritas a seguir.

➤ Condições externas de verão

Os dias de projeto de verão são baseados em frequência de ocorrência cumulativa de 0,4% das 8760 horas anuais, ou seja, o ar condicionado pode não atender à temperatura interna das zonas térmicas em aproximadamente 35 horas anuais. São selecionados 4 dias de projeto através da ASHRAE (2013) para cada uma das 3 propriedades psicrométricas definidas, sendo estas iguais para todos os dias, havendo modificações apenas na posição solar.

As datas selecionadas para os dias de projeto são baseadas em um fenômeno astronômico chamado solstício de verão, o qual pode ocorrer em 21 ou 22 de dezembro, simboliza o início da respectiva estação, e indica o dia do ano de maior tempo de incidência de radiação solar sobre o hemisfério sul da Terra. Portanto, foram escolhidos os dias 21, 22 e 23, visto que o EnergyPlus não permite datas iguais para propriedades psicrométricas diferentes. Logo, para a temperatura de bulbo seco optou-se pelos dias 21 de dezembro, janeiro, fevereiro e março. Já para temperatura de bulbo úmido foram preferidos os dias 22 dos mesmos meses. Por fim, em relação a propriedade conteúdo de umidade, foram selecionados os dias 23 dos respectivos meses.

A Tabela 5 apresenta os dados referentes ao dia de projeto de verão para temperatura de bulbo seco.

Tabela 5 - Dia de projeto de verão para temperatura de bulbo seco

Cidade	T_{bs} [°C]	MT_{bu} [°C]	ΔT_{bs} [°C]	V_{med} [m/s]	D_{vent} [°]
Artigas	35,3	22,8	11,9	3,8	0

Fonte: ASHRAE (2013).

Onde:

T_{bs} é a temperatura de bulbo seco, [°C];

MT_{bu} é a média coincidente da temperatura de bulbo úmido na temperatura de bulbo seco máxima de 35,3°C, [°C];

ΔT_{bs} é a amplitude de variação da temperatura de bulbo seco, [°C];

V_{med} é a média coincidente da velocidade do vento na temperatura de bulbo seco máxima de 35,3 °C, sendo a média obtida da mesma forma que MT_{bu} , [m/s];

D é a direção do vento (N = 0°; L = 90°; S = 180°; O = 270°).

O dia de projeto de verão com temperatura de bulbo úmido tem suas propriedades exibidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Dia de projeto de verão para temperatura de bulbo úmido

Cidade	T_{bu} [°C]	MT_{bs} [°C]	ΔT_{bu} [°C]	V_{med} [m/s]	D_{vent} [°]
Artigas	25,6	31,3	7,3	3,8	0

Fonte: ASHRAE (2013).

Onde:

T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido, [°C];

MT_{bs} é a média coincidente da temperatura de bulbo seco na temperatura de bulbo úmido máxima de 25,6°C, [°C];

ΔT_{bu} é a amplitude de variação da temperatura de bulbo úmido, [°C].

As propriedades do dia de projeto de verão para conteúdo de umidade são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 - Dia de projeto de verão para conteúdo de umidade

Cidade	w [g_w/kg_a]	MT_{bu} [°C]	$T_{orvalho}$ [°C]	ΔT_{bs} [°C]	V_{med} [m/s]	D_{vent} [°]
Artigas	19,2	22,8	24,1	4,4	3,8	0

Fonte: ASHRAE (2013).

Onde:

w é o conteúdo de umidade do ar em gramas de vapor d'água por kg de ar seco, [g_w/kg_a];

$T_{orvalho}$ é a temperatura do ponto de orvalho, [°C].

➤ Condições externas de inverno

Para o inverno definiram-se dois dias de projeto, o dia 21 de julho com alta nebulosidade e o dia 21 de junho (solstício de inverno) sem nebulosidade. Em relação às propriedades psicrométricas, optou-se por trabalhar com conteúdo de umidade e temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, conforme mesma metodologia adotada para os dias de projeto de verão, na frequência de ocorrência cumulativa de 99,6%. As propriedades para o dia 21 de julho, segundo a ASHRAE (2013), são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Dia de projeto de inverno com nebulosidade

Cidade	T_{bs} [°C]	T_{bu} [°C]	UR	ΔT_{bs} [°C]	V_{med} [m/s]	D_{vent} [°]
Artigas	0,9	0,9	100%	0	1,4	140

Fonte: ASHRAE (2013).

Onde:

UR é a umidade relativa do ar.

As condições externas para o dia 21 de junho são exibidas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dia de projeto de inverno para o céu sem nebulosidade

Cidade	T_{bs} [°C]	T_{bu} [°C]	UR	ΔT_{bs} [°C]	V_{med} [m/s]	D_{vent} [°]
Artigas	5	-2,1	60%	0	1,4	140

Fonte: ASHRAE (2013).

5.5.2 Infiltrações

Infiltrações referem-se ao fluxo de ar que adentra as zonas térmicas sem intenção através das superfícies do ambiente, como frestas em janelas e paredes, e através da abertura e fechamento das portas, as quais afetam diretamente o consumo de energia elétrica e o conforto térmico. Embora seja complexo quantificar com precisão as infiltrações, estas devem ser levadas em consideração para a seleção e operação do sistema de ar condicionado. Segundo o EnergyPlus (2016), a infiltração de ar nos ambientes é determinada através da equação 17.

$$I = (I_{projeto})(F_I)[A + B|(T_z - T_{bs,externa})| + C(U) + D(U^2)] \quad (17)$$

Onde:

I é a troca de ar por hora ou taxa de infiltração de ar, [1/h];

$I_{projeto}$ é a taxa de infiltração de ar de projeto definida para a zona térmica, obtida pela relação entre a vazão volumétrica de ar infiltrado e o volume interno do ambiente, [1/h];

F_I é a fração da taxa de infiltração de ar de projeto, que varia de 0 a 1;

A, B, C e D são os coeficientes de ajuste do cálculo de infiltração;

$T_{bs,externa}$ é a temperatura de bulbo seco externa, [°C];

U é a velocidade do vento, [m/s];

Por padrão, o EnergyPlus (2016) considera os coeficientes de ajuste de infiltração ($A=1$; $B=0$; $C=0$; $D=0$), resultando em uma taxa de infiltração constante e independente das condições.

Para a ASHRAE (2005), através de diversos estudos realizados em edificações localizadas na América do Norte, pode-se concluir através de histogramas que o nível de infiltração média em habitações novas é de 0,5 trocas de ar por hora. Portanto, para o presente

trabalho será empregado o valor de 0,5 trocas de ar por hora para o inverno. Já para o verão e estações intermediárias, baseado em Da Silva (2017) e Taube (2017), serão utilizados respectivamente os valores de 1 e 0,75 trocas de ar por hora, visto que nestas estações não há uma grande preocupação com o fechamento correto das portas e janelas. Para as zonas climatizadas, não serão consideradas infiltrações no intervalo em que o sistema de ar condicionado estiver em operação, visto que este gera uma pressão positiva no interior do ambiente.

6 RESULTADOS

Nesta seção serão mostrados e discutidos os resultados obtidos através das simulações, para a edificação em sua configuração atual e para a edificação com o novo sistema de ar condicionado e empregando as melhorias na envoltória.

6.1 Potências de Refrigeração e Aquecimento

Para o presente tópico, apresentam-se as potências ideais para cada zona térmica climatizada. Posteriormente, é feita uma comparação entre estas potências e as potências das máquinas instaladas atualmente na edificação. Por fim, são obtidas novas potências através do emprego de melhorias na envoltória, sendo estas confrontadas com as potências ideais obtidas inicialmente.

6.1.1 Potências Ideais

Para a obtenção das potências ideais de aquecimento e refrigeração para cada zona térmica climatizada, empregou-se o módulo *Ideal Loads Air System* do *software* EnergyPlus. Neste módulo, o *software* não leva em consideração as curvas de desempenho de máquinas reais, somente calcula a carga térmica para se atingir a temperatura de *setpoint* do ar condicionado. Para o térreo, segundo e terceiro pavimentos, as potências ideais de refrigeração e aquecimento e seus respectivos dias de projeto são mostrados no Apêndice B.

Analisando o térreo (Figura 8), constata-se uma superioridade das potências de aquecimento em relação às potências de refrigeração, apresentado a maior diferença nos ambientes que possuem maior quantidade de superfícies expostas ao meio externo, como é o caso das zonas 1, 12, 13 e 15. Nota-se também, que a máxima potência é exigida no momento

em que o sistema de climatização é posto em funcionamento, devido ao calor latente proveniente das infiltrações de ar.

Para o segundo pavimento (Figura 9), observa-se também, valores superiores nas potências de aquecimento em relação às potências de refrigeração nas zonas localizadas nas extremidades da edificação, como o caso das salas 16, 17, 33 e 34. Embora a zona 35 apresente grande área superficial em contato com meio externo, predomina-se nesta a potência de refrigeração, pois trata-se da secretaria administrativa do campus, sendo um ambiente com elevada ocupação e grande concentração de equipamentos de escritório, resultado em uma grande dissipação de calor que deve ser removido pelo sistema de climatização

Sabendo que as zonas compreendidas entre 36 e 43 do terceiro pavimento (Figura 10) e 16 a 23 do segundo pavimento possuem mesma área superficial, volume, ocupação, iluminação e equipamentos, pode-se fazer uma comparação direta entre as mesmas, constatando-se que as salas localizadas no terceiro pavimento possuem maior carga térmica, devido à proximidade com a cobertura, onde se localizam as temperaturas mais extremas da edificação, resultando em um maior fluxo de calor nas superfícies superiores das salas do terceiro andar, devido a uma maior diferença de temperatura.

6.1.2 Potência Instalada x Potência Ideal

Atualmente a edificação conta com um sistema de climatização do tipo *Split*, o qual é constituído de um conjunto de equipamentos para cada ambiente climatizado, composto por uma unidade condensadora e uma unidade evaporadora. A evaporadora é responsável por extrair calor do interior da zona térmica, já a condensadora tem a função de transferir o calor para o meio externo.

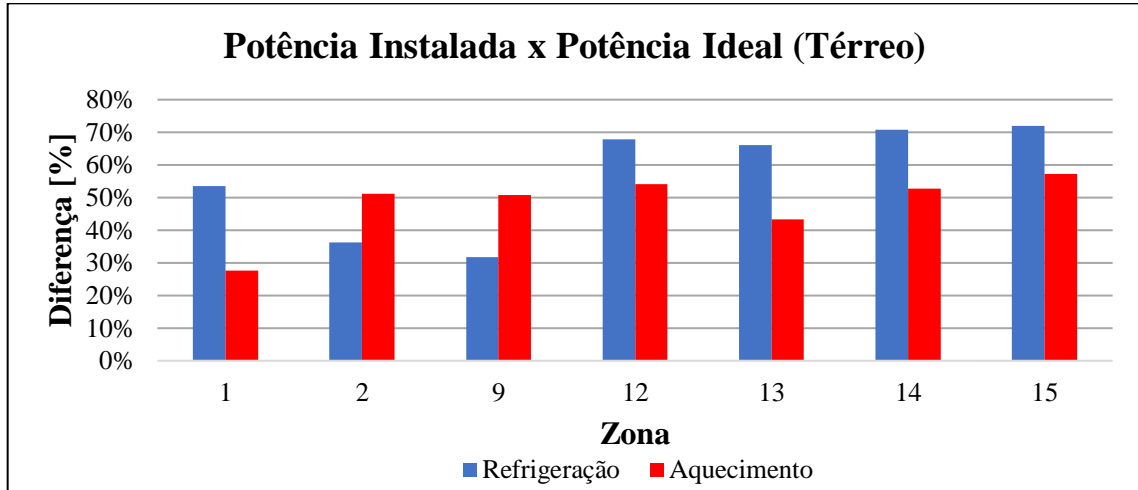
As informações referentes aos equipamentos instalados atualmente são mostradas no Anexo 2. Embora as potências de aquecimento e refrigeração sejam diferentes, tendo como base os desempenhos das máquinas, estas serão consideradas iguais baseadas nas capacidades nominais fornecidas pelo catálogo técnico de cada equipamento.

A diferença entre as potências ideais e as potências instaladas foram obtidas através da equação 18 apresentada a seguir.

$$Diferença [\%] = \frac{Potência\ Instalada - Potência\ Ideal}{Potência\ Instalada} \quad (18)$$

O gráfico da Figura 16 exibe a diferença das potências para o térreo, sendo a análise realizada confrontando a potência ideal com sua respectiva potência instalada para cada zona térmica.

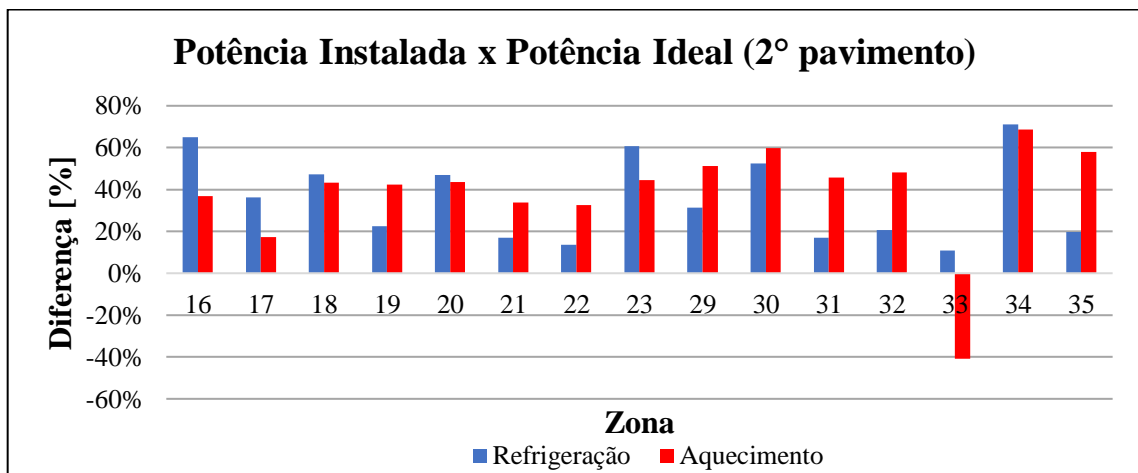
Figura 16 - Comparação entre a potência instalada x potência ideal para o térreo



Constata-se que todas as zonas do térreo possuem potências instaladas acima das potências ideais, das quais se destaca a zona térmica 12, com uma diferença de aproximadamente 54% superior à de aquecimento. A diferença está associada ao fato da edificação ter passado por um remanejamento em suas salas, onde inicialmente esta zona seria responsável pela sala de reuniões, a qual possui uma ocupação muito maior do que a sala de micrografia em análise, justificando o fato do superdimensionamento do equipamento.

A Figura 17 apresenta um gráfico de comparação das potências para o segundo pavimento.

Figura 17 - Comparação entre a potência instalada x potência ideal para o 2º pavimento



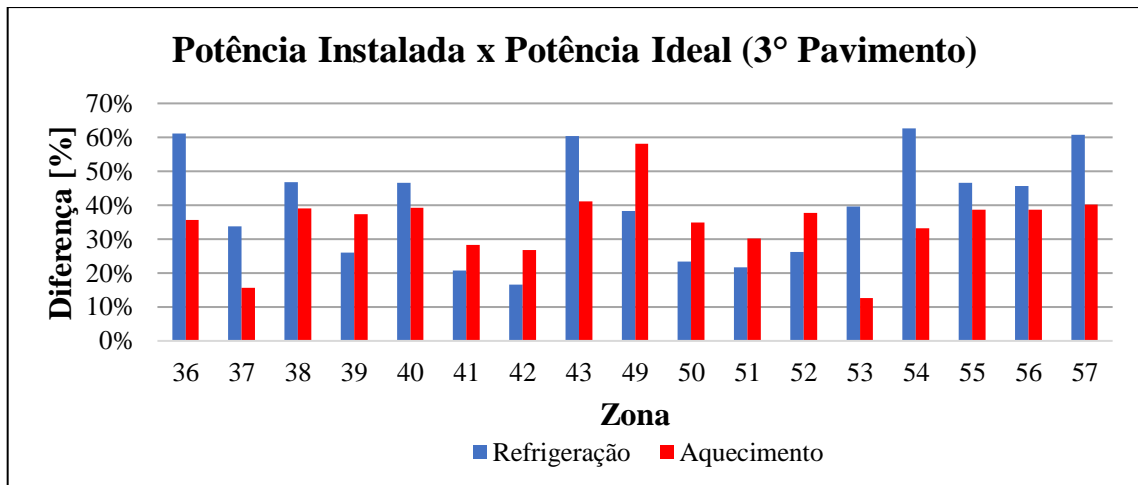
O segundo pavimento conta com 15 zonas climatizadas, onde somente uma possui o sistema de climatização subdimensionado. Esta potência instalada inferior à potência ideal de aquecimento na zona 33 é resultado das mudanças de sala do prédio, visto que em projeto essa

sala abrigaria o almoxarifado, o qual nem contava com sistema de climatização. Como medida provisória, pois atualmente este ambiente é destinado a reuniões e ao coordenador acadêmico, foi instalado um equipamento com potência inferior à necessária.

Dentre as zonas com máquinas superdimensionadas, destaca-se a zona 34, onde localiza-se o STIC, com potências instaladas superiores a 60% quando comparadas as ideais. No projeto da edificação, as salas 34 e 35 formavam uma única sala destinada somente a secretaria administrativa, contando com duas máquinas de ar condicionado de mesma potência instaladas em suas extremidades. Com a demanda de espaço, esta sala foi dividida em duas, dando origem a zona em análise, a qual possui ocupação e uma área de piso aproximadamente 2 vezes menor que a zona 35, justificando o fato do superdimensionamento da máquina.

O gráfico da Figura 18 apresenta a comparação para o terceiro pavimento.

Figura 18 - Comparação entre a potência instalada x potência ideal para o 3º pavimento



Por fim, o terceiro pavimento apresenta 17 zonas que são climatizadas através de equipamentos superdimensionados. Com isso, a edificação apresenta diversos indícios que não passou por um estudo prévio, em relação ao sistema de climatização, durante a fase de projeto, refletindo em grande desperdício de energia.

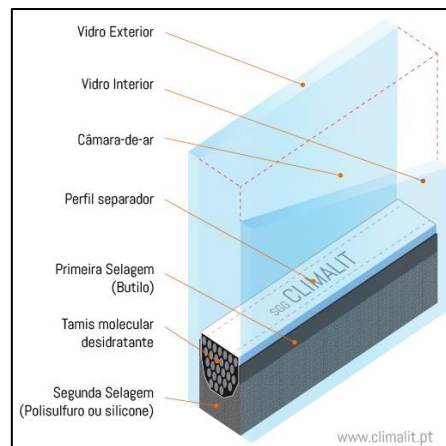
6.1.3 Potência Ideal Empregando Melhorias x Potência Ideal

Idealizando a redução das potências de refrigeração e aquecimento, para se atingir o *setpoint* do ar condicionado em cada zona térmica através de modificações na envoltória da edificação, foi proposta a substituição dos vidros simples, empregados atualmente, por vidros duplos. A ideia surgiu durante uma análise na zona térmica 1, a qual corresponde à biblioteca do campus, onde constatou-se que dos 146,4 m² de área superficial externa, 72,5 m² são

ocupados pelas janelas, ou seja, aproximadamente 50% da área superficial externa da zona é constituída por vidros.

Através do catálogo de um fabricante de vidros duplos, optou-se pelo modelo *Climalit® Plus Solar Control*, recomendado para isolamento térmico e controle solar, composto basicamente por um vidro externo, uma câmara de ar e um vidro interno, conforme exibido na Figura 19.

Figura 19 - Vidro duplo



Fonte: Saint-Gobain (2015).

As propriedades ópticas dos vidros interno e externo obtidas através do *software* Window 7.5 são mostradas na Tabela 10. A câmara de ar possuirá espessura de 16 milímetros.

Tabela 10 - Propriedades ópticas do vidro duplo

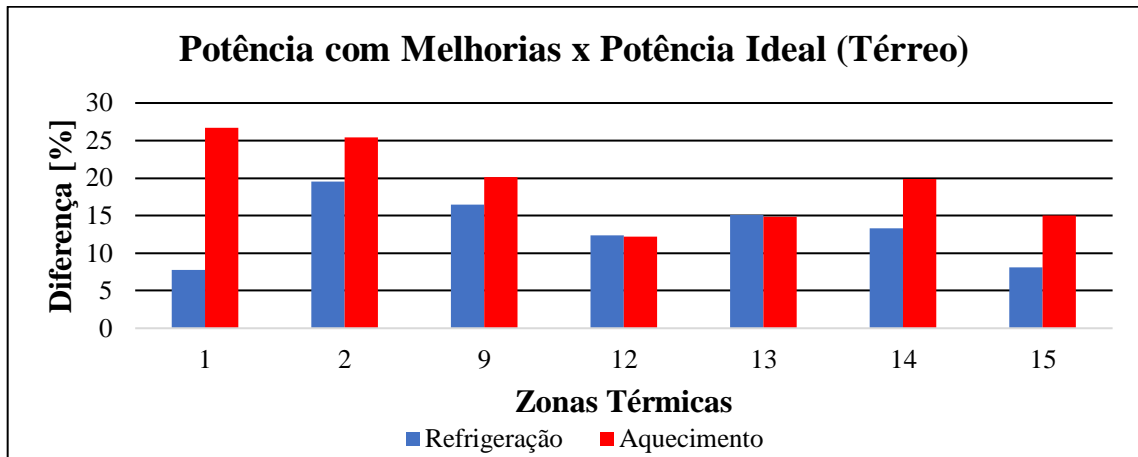
Vidro	SGG COOL-LITE SKN 154 II	Planiclear
$e_{m,v}$ [mm]	6	4
τ_s	0,243	0,871
R_{fs}	0,554	0,078
R_{bs}	0,315	0,077
τ_v	0,565	0,905
R_{fv}	0,172	0,082
R_{bv}	0,152	0,082
τ_{ir}	0	0
ϵ_f	0,016	0,84
ϵ_b	0,84	0,84
k [W/m.K]	1	1

Fonte: Lawrence Berkeley National Laboratory (2018).

As novas potências ideais de refrigeração e aquecimento e seus respectivos dias de projeto, obtidos após a simulação empregando as modificações, são mostradas no Apêndice C. Através de uma relação semelhante a equação 18, determina-se a diferença percentual entre a potência ideal e a potência ideal empregando as modificações na envoltória.

O gráfico da Figura 20 exhibe a comparação entre as potências para o térreo.

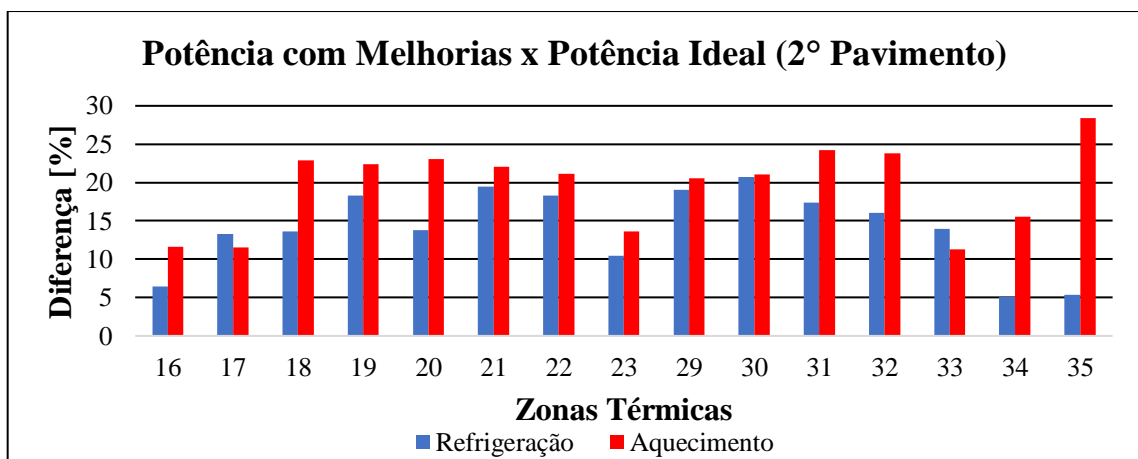
Figura 20 - Potência empregando melhorias x Potência ideal para o térreo



Como esperado, a zona térmica 1 apresentou a maior redução em relação às demais zonas do térreo, chegando a valores superiores a 25% em relação à potência de aquecimento. Esta redução é associada diretamente ao baixo coeficiente global de transferência de calor que o vidro duplo apresenta, visto que o ar aprisionado no interior da câmara tem a função de ser um isolante térmico. A diminuição da potência de refrigeração é menor quando comparada a de aquecimento devido às cargas internas da zona que não foram modificadas, como o sistema de iluminação e os equipamentos, e também, deve-se lembrar que se trata de uma sala com grande ocupação.

A Figura 21 apresenta o gráfico para o segundo pavimento.

Figura 21 - Potência empregando melhorias x Potência ideal para o 2º pavimento

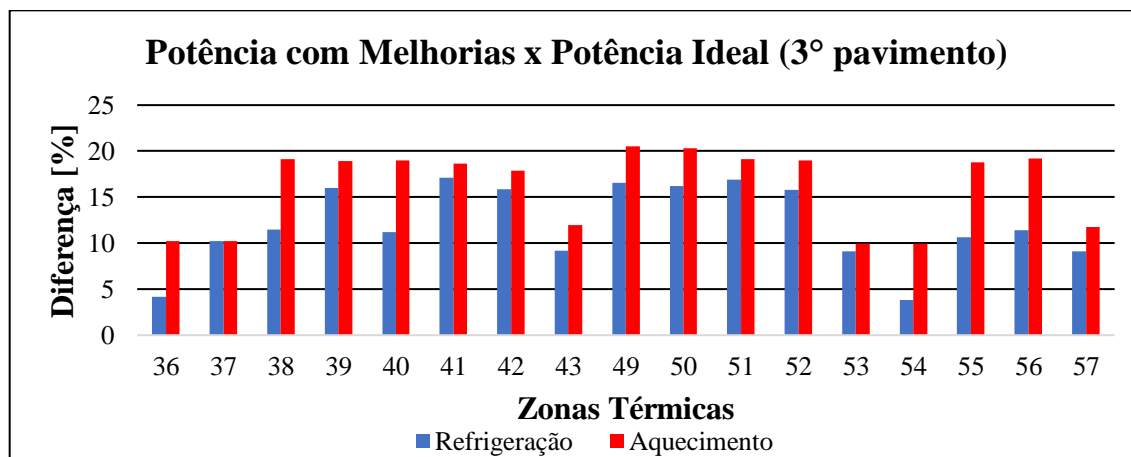


No segundo pavimento, nota-se a maior redução na potência de aquecimento da zona 35, chegando próximo aos 30%, devido ao fato desta zona possuir a maior área superficial externa coberta por vidros quando comparada às outras salas deste pavimento, contando com 8 janelas que medem em torno de 2,3 m². A diminuição da potência de refrigeração foi de aproximadamente 5%, inferior à de aquecimento em consequência da sala conter 9 ocupantes, diversos computadores e o sistema de iluminação, que acabam por dissipar calor, o qual auxilia

o sistema de climatização no inverno, e em condições de verão deve ser removido do ambiente para que se atinja a temperatura do *setpoint* do termostato.

O gráfico para o terceiro pavimento é mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Potência empregando melhorias x Potência Ideal para o 3º pavimento



No terceiro pavimento, constata-se a redução da potência de refrigeração e aquecimento para todas as zonas com a aplicação dos novos vidros. Nota-se que a redução foi menor nas zonas que apresentam maior área de parede exposta ao meio externo, como é o caso das zonas 36, 37, 53, 54 e 57. Uma possível solução para esse problema seria a aplicação de determinado material isolante junto a essas paredes, reduzindo a transferência de calor, porém, esta modificação é mais complexa e acaba por fugir aos objetivos do trabalho, ficando apenas como uma recomendação.

Pode-se concluir também, que em todas as zonas térmicas que contam com modificações na envoltória a redução na potência de aquecimento foi maior que a de refrigeração. A ocorrência dessa diferença é vinculada ao fato das cargas internas, as quais não sofreram modificações, contribuírem com o sistema de climatização em dias de baixa temperatura e desfavorecem o sistema em dias de verão. Deve-se frisar também a relação com as cargas externas, como a radiação solar, que mesmo com a modificação dos vidros não impacta tanto na diminuição da potência de refrigeração, pois a edificação conta com brises e cortinas, responsáveis por bloquear a luz solar e evitar a incidência de radiação nas janelas.

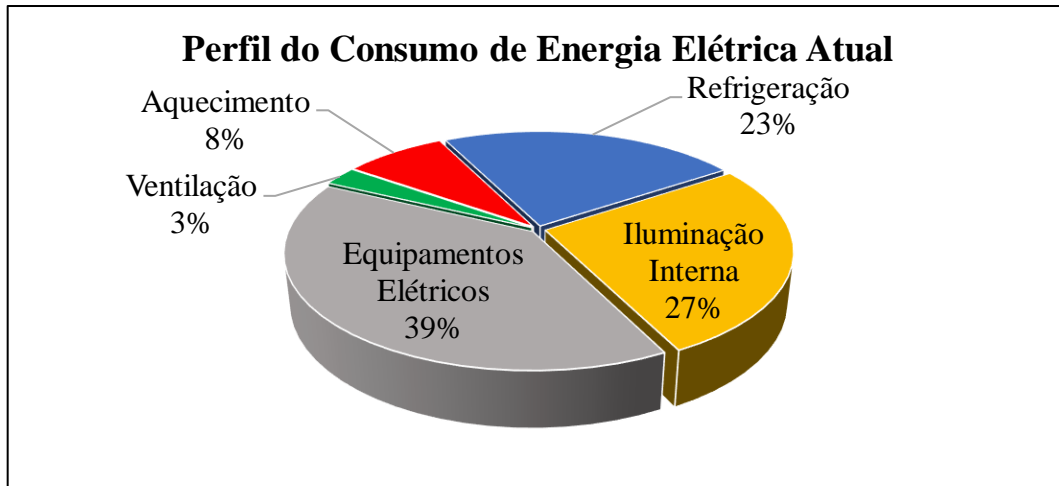
6.2 Consumo de Energia Elétrica

O consumo de energia elétrica atual, e o consumo de energia elétrica da edificação empregando modificações na envoltória e o sistema de ar condicionado proposto, são detalhados a seguir. Por fim, os consumos do caso base e do caso proposto são comparados.

6.2.1 Consumo Atual da Edificação

O consumo de energia elétrica atual da edificação é dividido em 3 parcelas: climatização, iluminação e equipamentos. Visando facilitar a discussão dos resultados, segmenta-se o consumo do sistema de climatização em aquecimento, refrigeração e ventilação. O perfil de consumo anual da edificação atualmente é mostrado na Figura 23.

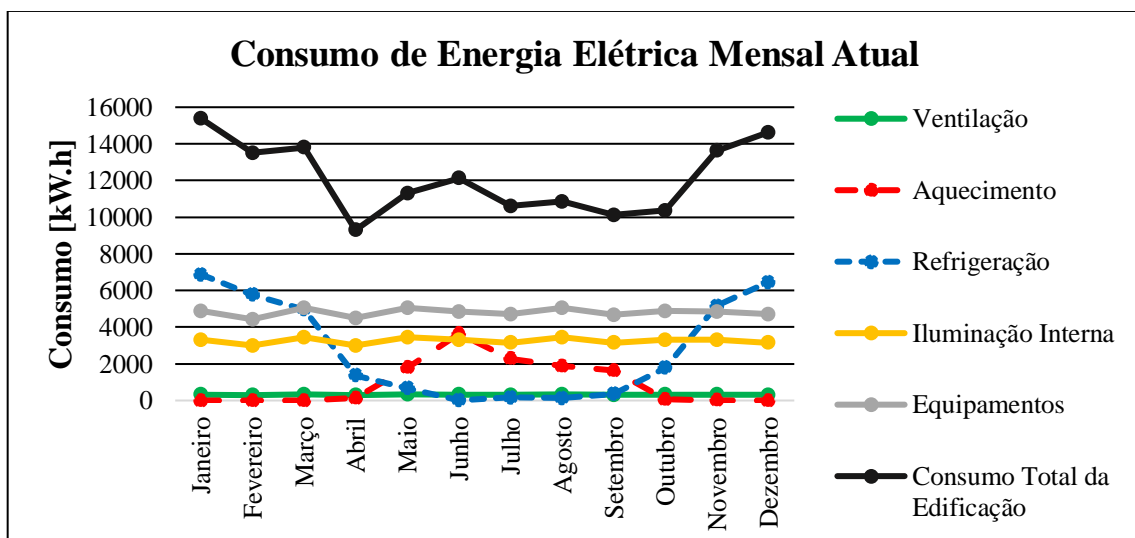
Figura 23 - Perfil do consumo de energia elétrica anual da edificação atual



Atualmente, o consumo total da edificação é de 145663,44 kW.h, sendo os equipamentos elétricos responsáveis pela maior parcela de consumo, por volta de 57645,76 kW.h anuais. Na sequência, tem-se o sistema de climatização, responsável pelo consumo de aproximadamente 48971,91 kW.h, onde destaca-se o segmento de refrigeração com um consumo anual de 33727,98 kW.h. Por fim, a iluminação interna corresponde a 27% do consumo anual total da edificação, sendo em torno de 39045,77 kW.h.

O perfil de consumo mensal da edificação atualmente é apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Consumo de energia elétrica mensal da edificação atual



Para o perfil mensal, nota-se um consumo acentuado do sistema de refrigeração nos meses de janeiro e dezembro, respectivamente iguais a 6876,42 kW.h e 6460,46 kW.h, visto que o sistema de refrigeração equivale nestes meses de verão a aproximadamente 45% e 44% do consumo total mensal da edificação. Já o sistema de aquecimento se sobressai no mês de junho, consumindo em torno de 3647,19 kW.h, representando cerca de 30% do consumo total mensal.

Os equipamentos elétricos e o sistema de iluminação possuem um consumo praticamente constante, onde os meses de abril e outubro são os mais representativos, nos quais estas duas parcelas possuem em torno de 80% e 79% do consumo mensal total do prédio, respectivamente, visto que nesses meses o sistema de climatização possui menor consumo. Em relação ao sistema de ventilação, este se mantém basicamente constante o ano inteiro.

6.2.2 Consumo do Novo Sistema

Com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica da edificação, propõe-se a troca do sistema atual *Split* por um sistema de climatização do tipo VRF. O sistema de ar condicionado de Vazão Variável de Refrigerante é composto de uma máquina externa (condensadora) que possui capacidade de alimentar diversas máquinas internas (evaporadoras). Através de unidades externas com compressores de rotação variável e válvulas de expansão eletrônicas posicionadas nas unidades internas, modula-se a vazão mássica de refrigerante necessária para cada ambiente, conforme sua respectiva carga térmica. Com este tipo de equipamento pode-se reduzir o desperdício de energia elétrica, visto que a máquina opera somente para retirar ou fornecer o calor necessário para se obter o *setpoint* de temperatura para cada zona térmica. Deve-se salientar também, que com o avanço da tecnologia, atualmente existem trocadores de calor e compressores de maior eficiência, garantindo bons coeficientes de desempenho das máquinas de climatização.

As máquinas internas foram selecionadas através do catálogo de um fabricante, sendo levadas em consideração para a escolha as potências ideais obtidas após as melhorias na envoltória da edificação (Apêndice C). Portanto, o Anexo 3 exhibe os modelos de máquinas internas selecionadas e suas respectivas potências de aquecimento e refrigeração.

Em relação às máquinas externas, optou-se por 3 máquinas, sendo cada uma responsável pelas máquinas internas instaladas em seu respectivo pavimento. Para a seleção das máquinas, são somadas as potências ideais pós melhorias para cada pavimento, tendo para o térreo 32442,7 W de refrigeração e 37640,6 W de aquecimento. Já para o segundo pavimento, obtemos 53479,5

W e 44925,96 W, respectivamente. O terceiro pavimento tem potências iguais a 50018,4 W e 52907 W, seguindo a mesma ordem.

O fabricante recomenda fatores de correção para as potências que englobam o comprimento e o desnível da tubulação. Considerando um desnível de 10 metros e um comprimento de aproximadamente 70 metros, tem-se um fator de correção de aproximadamente 0,955 para refrigeração e de 0,983 para aquecimento.

Para que fosse atingido o *setpoint* de temperatura média do ar em cada zona e, empregando os fatores de correção, foi necessário selecionar máquinas externas com potências acima das descritas anteriormente, visto que no modo em que foram obtidas as potências ideais, o *software* não leva em consideração as curvas de desempenho de máquinas reais. Com as devidas considerações são selecionadas as máquinas externas com características exibidas na Tabela 11.

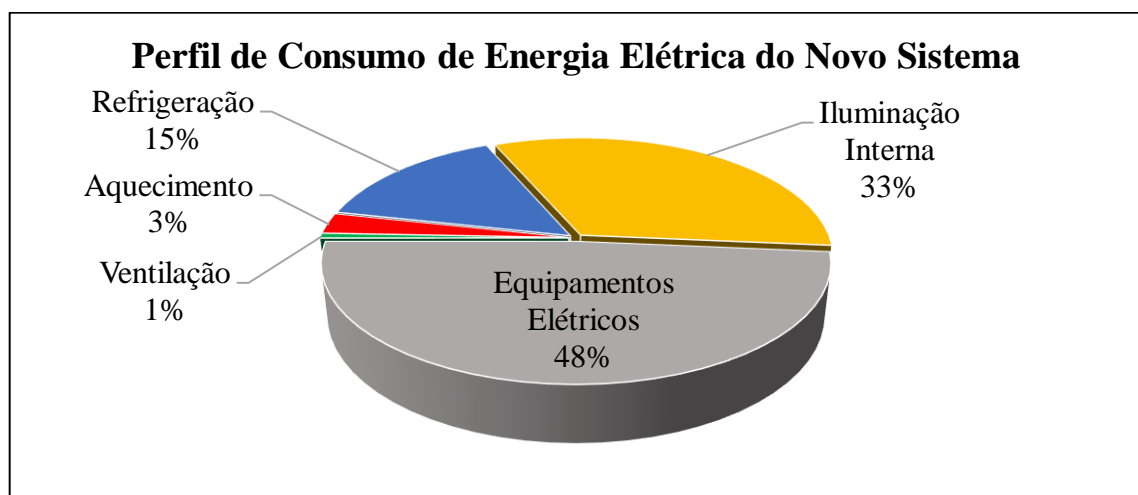
Tabela 11 - Máquinas externas VRF

Pavimento	Potência [W]		Vazão [m ³ /s]	COP	
	Refrigeração	Aquecimento		Refrigeração	Aquecimento
Térreo	45000	50000	3,89	4,1	4,6
2°	61500	69000	4,45	3,74	4,03
3°	61500	69000	4,45	3,74	4,03

Fonte: Midea (2017).

O novo perfil de consumo da edificação empregando as melhorias na envoltória e o novo sistema de climatização é mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Perfil do consumo de energia elétrica anual para o novo sistema

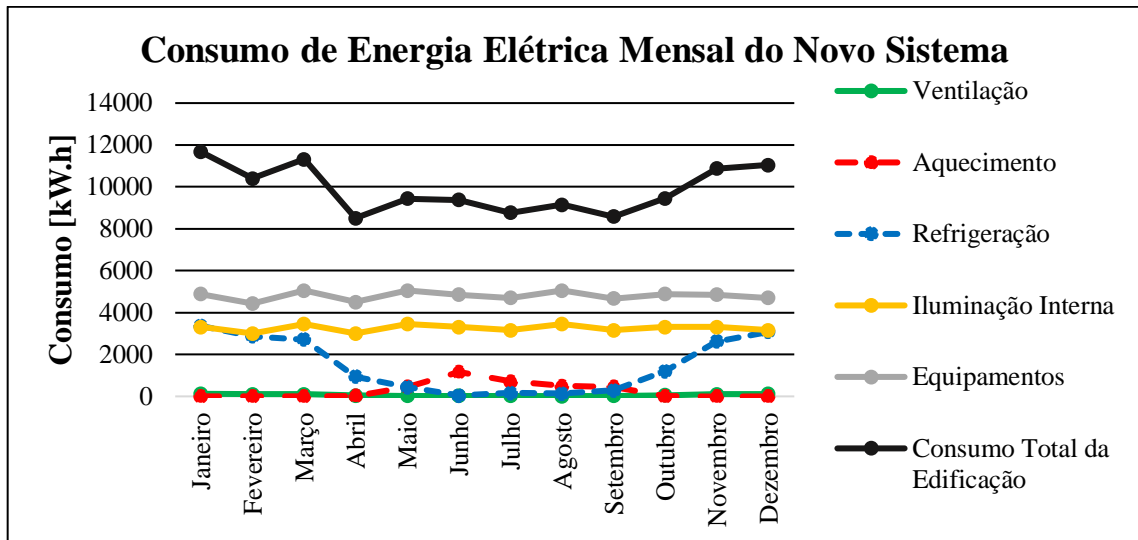


Com essa nova configuração a edificação possui um consumo total anual de 118618,09 kW.h. Os equipamentos elétricos e o sistema de iluminação que representam as maiores parcelas não tiveram o consumo modificado em relação ao caso base, visto que nenhuma

alteração foi realizada em cima destes. Já a refrigeração, que representa a maior parcela do sistema de climatização, equivale a 17867,56 kW.h anuais, seguida pelo aquecimento com 3316,03 kW.h. Por fim, a menor parcela que é indicada pela ventilação consome anualmente 742,97 kW.h.

O gráfico da Figura 26 apresenta o novo consumo mensal da edificação.

Figura 26 - Consumo de energia elétrica mensal do novo sistema



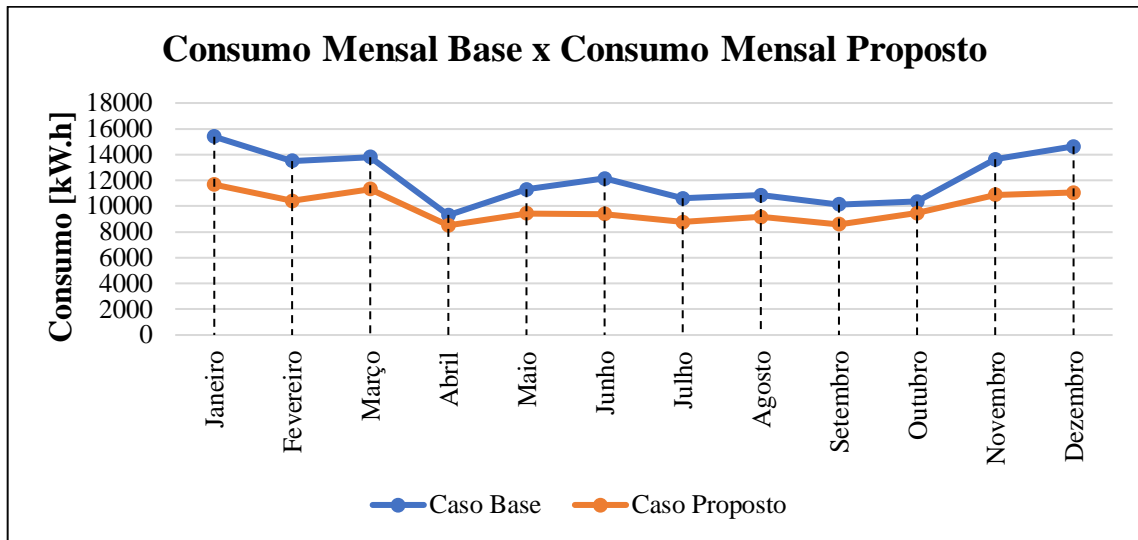
Constata-se o maior consumo no mês de janeiro, sendo em torno de 11669,3 kW.h, representando aproximadamente 10% do consumo total anual. Neste mês, a parcela mais significativa é advinda dos equipamentos elétricos, os quais correspondem a praticamente 42% do consumo mensal, seguidos pelo sistema de refrigeração e iluminação interna, com consumos próximos a 3350 kW.h, onde cada fração representa 28% do consumo do mês.

O sistema de aquecimento é mais influente em junho quando comparado aos outros meses, representando cerca de 12% dos 9382,8 kW.h consumidos neste mês. O menor consumo anual é obtido em abril, quando são gastos 8509,7 kW.h, destacando-se os equipamentos e a iluminação, com parcelas de 53% e 36%, respectivamente, do total utilizado no mês.

6.2.3 Atual x Proposto

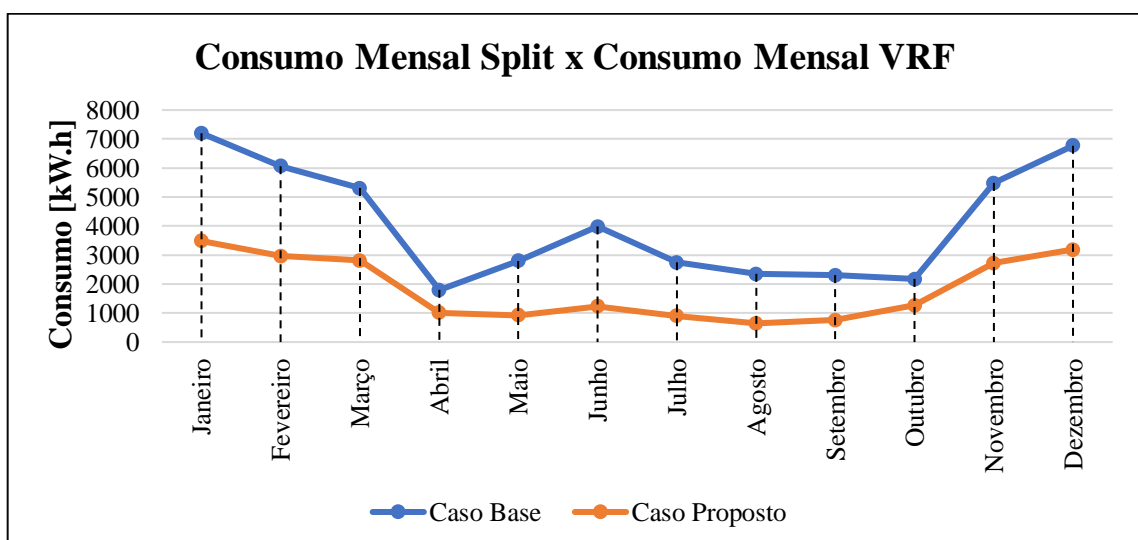
O comparativo entre o consumo total de energia elétrica atual da edificação (caso base) e o consumo do novo sistema de climatização empregando melhorias na envoltória (caso proposto) é mostrado no gráfico da Figura 27.

Figura 27 - Comparação entre os consumos de energia elétrica do caso base e proposto



Com o emprego do sistema VRF e a substituição dos vidros simples por vidros duplos, pode-se obter uma redução no consumo total de energia elétrica anual de aproximadamente 27045,4 kW.h, ou seja, uma diminuição comparada ao consumo total atual de 18,6%. Tal redução é evidenciada nos meses onde o sistema de ar condicionado era mais influente, como é o caso de dezembro, que apresentou redução mensal de 24,5%, próxima aos 3579,6 kW.h. Logo em seguida, tem-se o mês de janeiro com redução por volta de 3715 kW.h, representando uma diminuição de 24,2% do consumo neste mês. O mês de junho, onde foi evidenciado anteriormente o maior consumo pelo sistema de aquecimento, teve uma redução de 22,7% em relação ao consumo mensal do prédio em sua configuração atual.

Em relação a somente o sistema de climatização, que engloba a refrigeração, aquecimento e ventilação, criou-se o gráfico da Figura 28, que compara o consumo de energia elétrica do sistema atual e do sistema proposto para todos os meses do ano.

Figura 28 - Comparação entre o consumo de energia elétrica mensal do sistema *Split* x VRF

Considerando somente o sistema de ar condicionado, obtém-se uma redução anual no consumo de energia elétrica de aproximadamente 55,2%, sendo os mesmos 27045,4 kW.h destacados anteriormente, visto que só houve modificações relacionadas ao sistema de climatização. Dentre as parcelas deste sistema, a ventilação obteve a maior redução, sendo cerca de 80,5%, seguida pelo aquecimento com 71% e a refrigeração que reduziu o seu consumo em aproximadamente 47% quando comparada a do sistema *Split*.

As justificativas para a redução do consumo de energia elétrica da edificação podem ser divididas em 3 tópicos, discutidos a seguir.

1. Das 39 zonas climatizadas que compõem a edificação, 38 contavam com máquinas de ar condicionado superdimensionadas, que representam um grande desperdício de energia;
2. A substituição dos vidros simples por vidros duplos acaba por reduzir as potências de refrigeração e aquecimento necessárias para se atingir o *setpoint* de temperatura das zonas térmicas, proporcionando que sejam selecionados equipamentos de climatização de menor porte.
3. O sistema VRF, que conta com um regime de operação baseado na carga térmica das zonas, onde o compressor modula-se para fornecer somente a vazão de fluido refrigerante necessário para as unidades internas adicionarem ou retirarem calor do ambiente, reduzindo seu tempo e carga de funcionamento, refletindo na redução do consumo de energia elétrica.

Deste modo, os motivos que ocasionaram a diminuição do consumo resumem-se em melhorias na envoltória da edificação e um sistema de ar condicionado mais eficiente e devidamente dimensionado, reduzindo perdas e desperdícios de energia.

6.3 Conforto Térmico

Com a intenção de complementar o trabalho desenvolvido, é realizada uma análise de conforto térmico da zona térmica 1, que corresponde à biblioteca do campus, escolhida por ser a zona mais representativa da edificação, pois esta sala já foi considerada no Item 6.1.3 para a escolha das modificações na envoltória e por tratar-se de um ambiente com elevada ocupação e, com alta incidência solar pela manhã na fachada leste e pela tarde na fachada oeste.

A análise fundamenta-se nos parâmetros de conforto térmico estabelecidos pela ASHRAE na Figura 2 e por recomendações das NBR 16401-2. Serão avaliadas propriedades

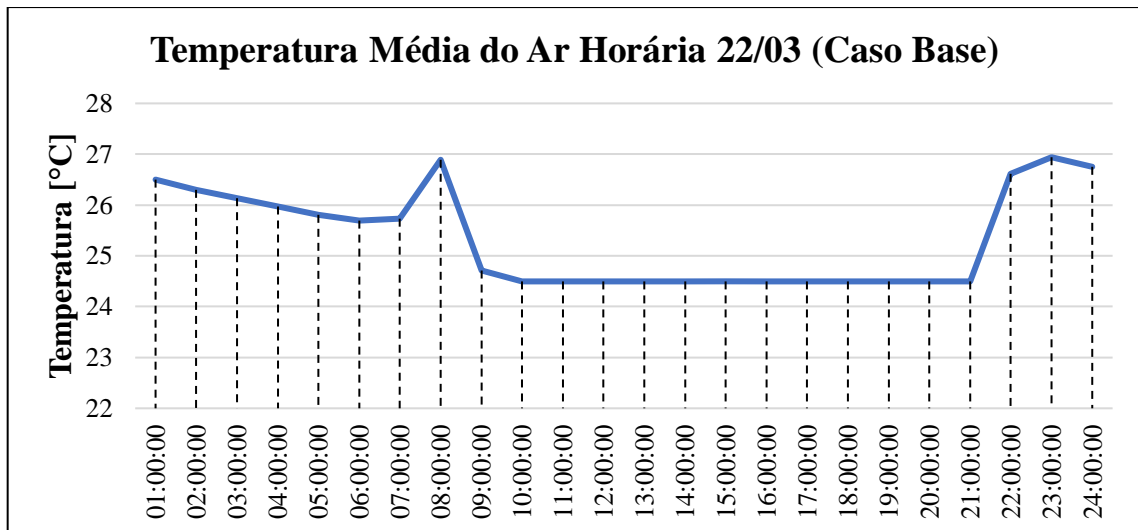
psicrométricas como temperatura de bulbo seco média do ar da zona e umidade relativa. As temperaturas média radiante e operativa e o índice PMV também serão analisados.

A fim de selecionar o dia em que será feita a verificação do conforto térmico, para a edificação atual com o sistema *Split* e para edificação com sua nova configuração na envoltória e com o sistema VRF, foram analisados os PMV's de todos os dias de projeto, onde constatou-se que o dia 22 de março apresenta o maior valor, sendo este utilizado para a devida análise.

6.3.1 Caso Atual

A temperatura média horária do ar da zona 1 para a edificação em sua situação atual é mostrada no gráfico da Figura 29.

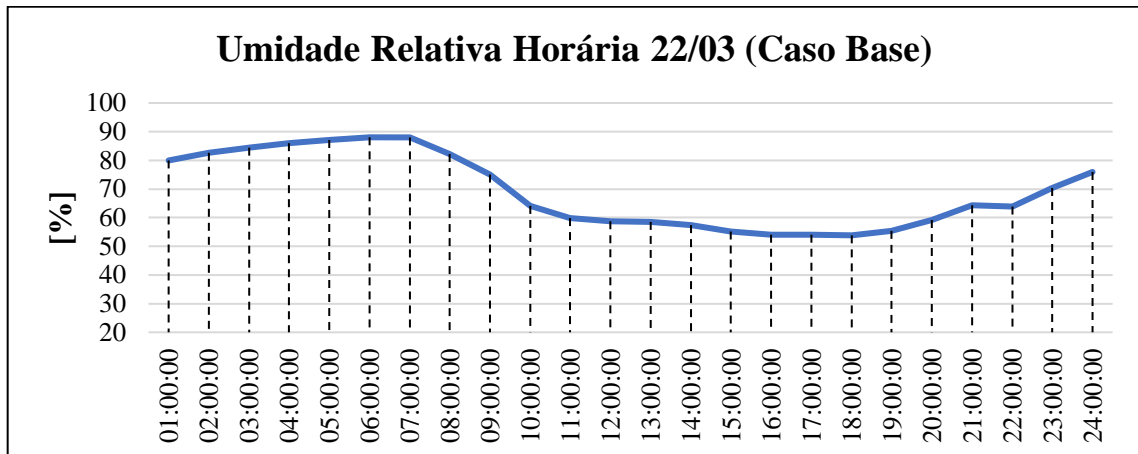
Figura 29 - Temperatura média do ar horária da zona 1 para o caso base



Sabendo que a temperatura média do ar da zona para conforto térmico no verão é de 24,5°C, nota-se que as máquinas de ar condicionado instaladas atualmente conseguem manter o *setpoint* de temperatura, visto que para refrigeração o sistema possui uma potência de refrigeração aproximadamente 53,5% acima da potência ideal.

A umidade relativa horária do ar da zona é exibida no gráfico da Figura 30.

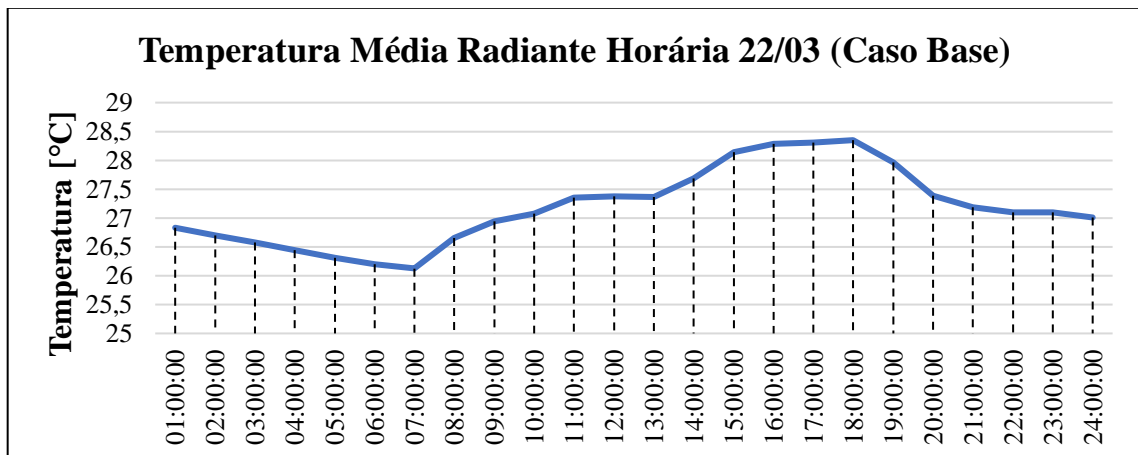
Figura 30 - Umidade relativa horária da zona 1 para o caso base



Embora a umidade relativa do ar do ambiente seja alta, com valores próximos a 90% devido às infiltrações de ar na zona térmica no período da noite, pode-se notar que com o funcionamento do sistema de ar condicionado se tem uma redução da mesma, ficando próxima aos 65% recomendados pela norma. A redução ocorre devido ao sistema de climatização reduzir a temperatura da mistura de ar abaixo de sua temperatura de orvalho, fazendo com que ocorra a condensação do vapor de água, diminuindo assim a umidade relativa.

A temperatura média radiante da zona térmica 1 é mostrada no gráfico horário da Figura 31.

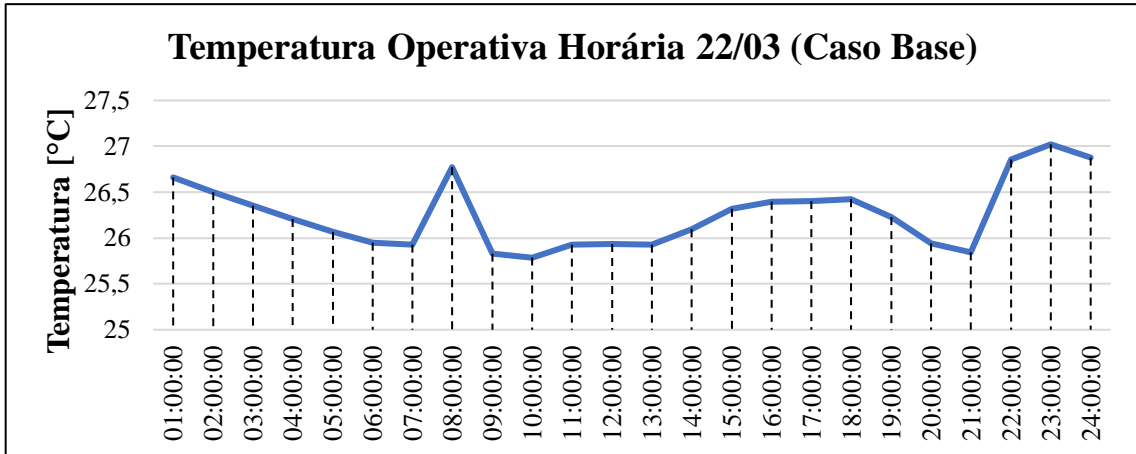
Figura 31 - Temperatura média radiante horária da zona 1 para o caso base



Embora a edificação conte com dispositivos bloqueadores de raios solares, como brises e cortinas, pode-se notar o aumento da temperatura das superfícies internas da zona térmica devido à transmissão de radiação solar através dos vidros. Pode-se notar que a temperatura média radiante é maior no intervalo compreendido entre as 15:00 e 18:00 horas quando comparado ao intervalo das 07:00 às 11:00 horas, visto que no intervalo da tarde o sol incide na fachada oeste, a qual possui uma área de vidro aproximadamente 42% maior que da fachada leste.

O gráfico da Figura 32 exibe o comportamento da temperatura operativa durante as horas do dia 22 de março para a zona térmica 1.

Figura 32 - Temperatura operativa horária da zona 1 para o caso base

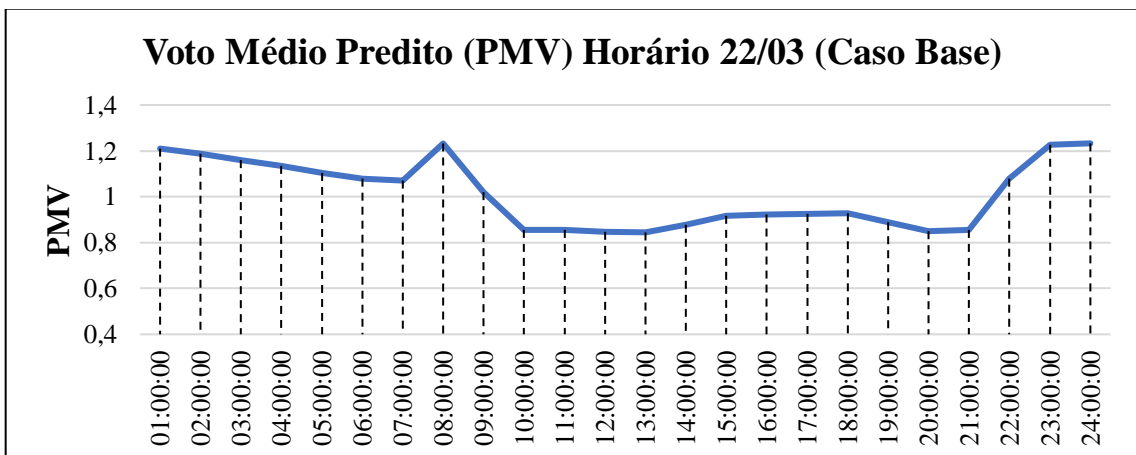


Constata-se um aumento da temperatura operativa no período compreendido entre as 10:00 e as 18:00, pois esta depende diretamente da temperatura média radiante, que sofre um incremento devido à incidência solar nas fachadas leste e oeste durante os períodos da manhã e da tarde, visto que a temperatura média do ar da zona não se altera e se mantém na temperatura de *setpoint*.

Realizando uma análise mais detalhada para o horário das 18:00 horas, o qual apresenta temperatura operativa igual a 26,5°C e umidade relativa de aproximadamente 55%, conclui-se que a condição de conforto térmico para verão da Figura 2 não é atingida, visto que para se obter tal condição, a temperatura operativa deveria ser inferior a 26,2°C.

Por fim, o PMV horário para o dia selecionado é mostrado no gráfico da Figura 33.

Figura 33 - Voto médio predito horário da zona 1 para o caso base



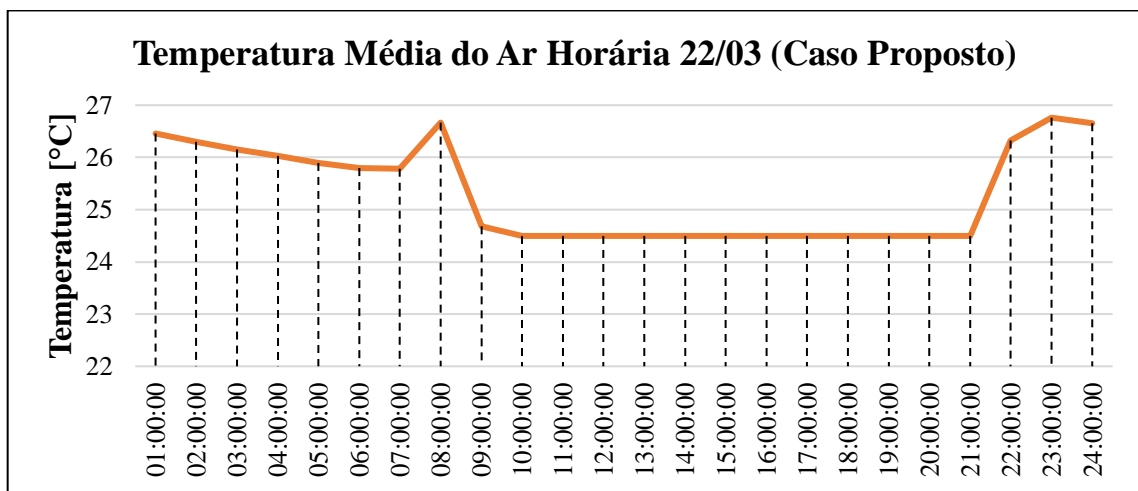
Portanto, constata-se que o PMV não atende em nenhum horário de funcionamento do sistema de climatização o valor de +0,5 recomendado por norma, chegando a valores próximos e até superiores a +0,9 no intervalo da tarde compreendido entre as 13:00 e as 18:00, podendo

este fato ser associado ao aumento da temperatura média radiante, que por consequência gera um acréscimo na temperatura operativa, devido à incidência solar na fachada oeste da zona térmica.

6.3.2 Caso Proposto

Para o sistema VRF dimensionado para as melhorias na envoltória, tem-se o gráfico de temperatura média horária do ar da zona térmica 1 mostrado na Figura 34.

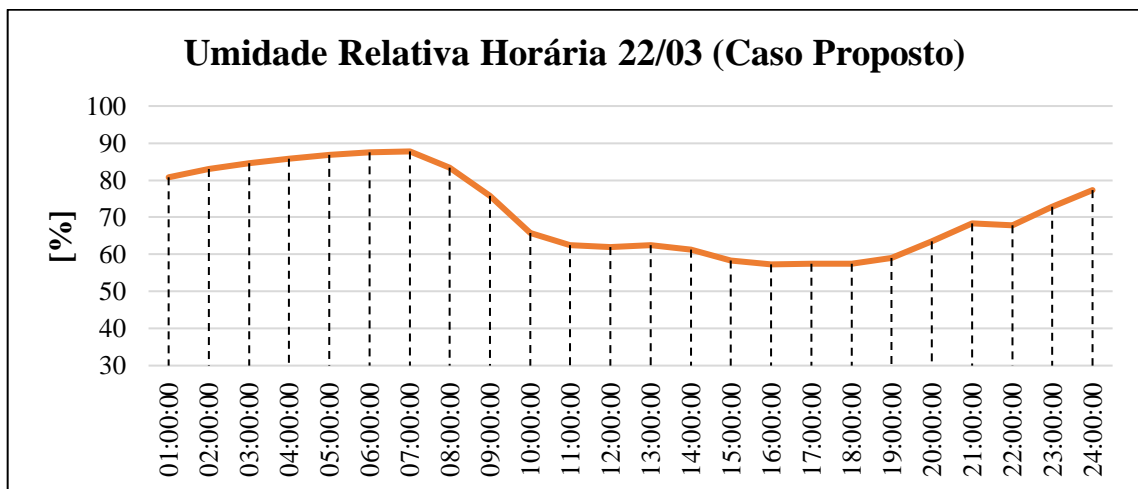
Figura 34 - Temperatura média horária do ar da zona 1 para o caso proposto



Analisando o gráfico, constata-se que o novo sistema de ar condicionado possui potência necessária para se alcançar a temperatura de *setpoint*, a qual se mantém constante na temperatura recomendada de 24,5°C.

A umidade relativa para o caso proposto é exibida no gráfico da Figura 35.

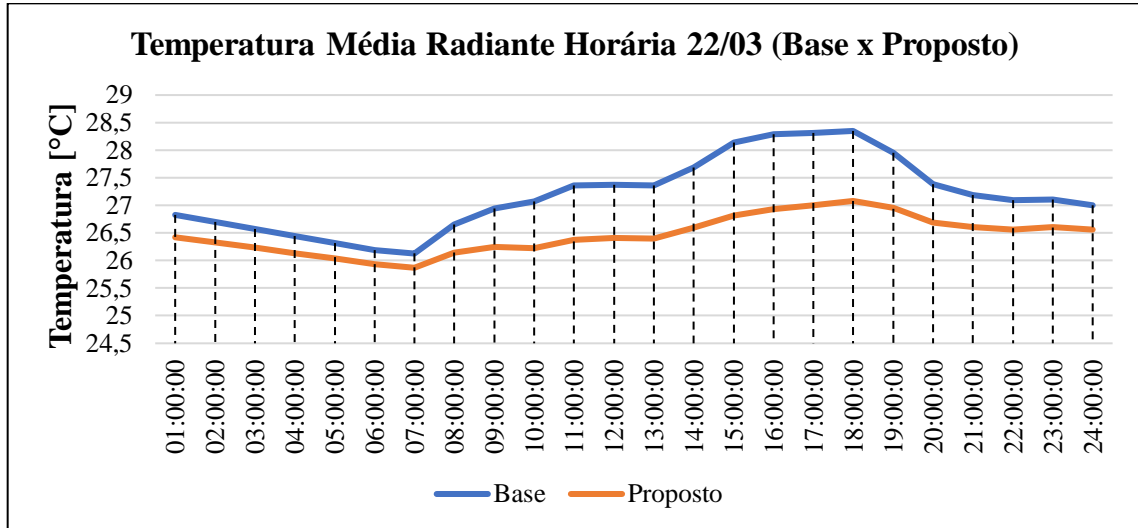
Figura 35 - Umidade relativa horária da zona 1 para o caso proposto



Nota-se que a umidade relativa da zona em grande parte do tempo encontra-se dentro dos parâmetros recomendados por norma, os quais sugerem um máximo de 65%.

O gráfico da Figura 36 apresenta uma comparação da temperatura média radiante para os casos das máquinas instaladas atualmente e o sistema VRF com as modificações na envoltória.

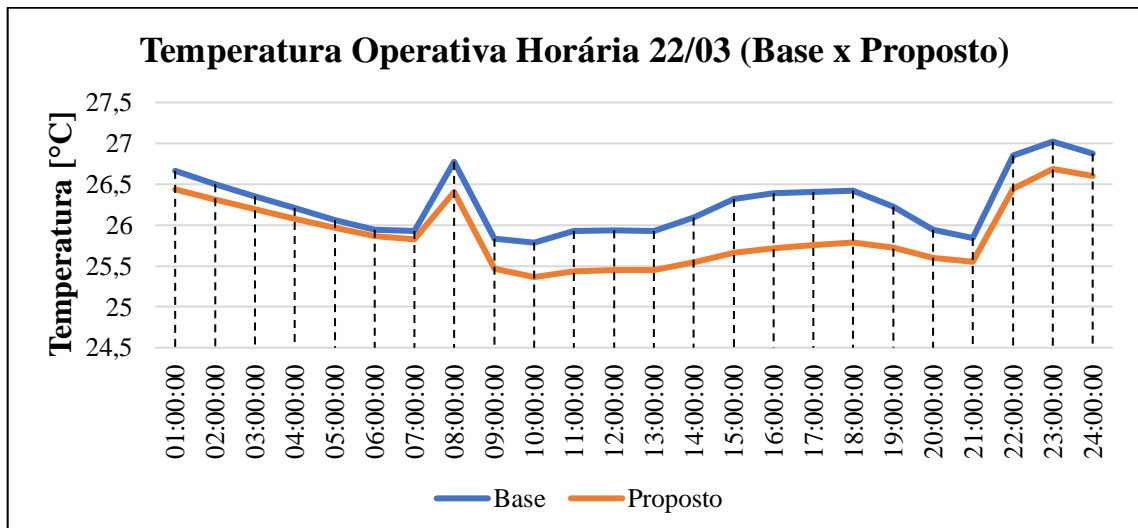
Figura 36 - Comparação entre as temperaturas médias radiante para o caso base e proposto



A diferença entre os dois casos está ligada diretamente com as modificações na envoltória da edificação, onde os vidros simples foram substituídos por vidros duplos. Realizando uma comparação entre os vidros, constata-se que o vidro externo no caso proposto possui transmitância 3,3 vezes menor quando comparada ao vidro simples empregado atualmente. Já a refletância possui valor aproximadamente 7,4 vezes maior, reduzindo a incidência de radiação solar no interior da zona térmica, proporcionando a redução da temperatura média radiante.

A comparação entre a temperatura operativa horária da zona térmica 1 para o caso atual e o caso proposto é mostrada na Figura 37.

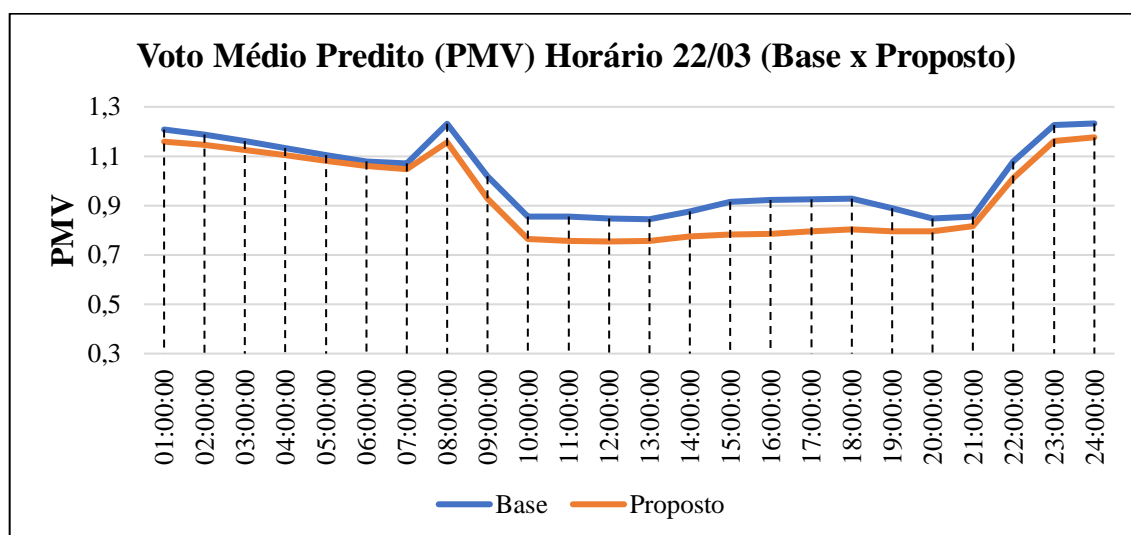
Figura 37 - Comparação entre as temperaturas operativas para o caso base e proposto



Pode-se notar uma grande redução da temperatura operativa com a nova configuração da edificação, visto que com a substituição dos vidros houve uma diminuição significativa da temperatura média radiante, principalmente no intervalo da tarde. Fazendo uma análise mais crítica para o horário das 18:00 horas, onde se tem temperatura operativa e umidade relativa de aproximadamente 25,8°C e 57,5%, respectivamente, pode-se concluir que com as modificações a zona térmica 1 está dentro da zona de conforto térmico estabelecida pela ASHRAE no gráfico da Figura 2.

Por fim, o gráfico da Figura 38 mostra um comparativo para o PMV para a zona térmica em análise.

Figura 38 - Comparação entre o Voto Médio Predito para o caso base e proposto



Com a redução da temperatura média radiante e a temperatura operativa, constata-se uma melhora no PMV, principalmente no intervalo compreendido entre as 10:00 e as 20:00 horas. Com isso, o novo PMV obtido varia em torno de +0,8, o qual ainda não se enquadra no intervalo aconselhado por norma. Uma possível solução para se atingir um valor mais próximo ou até ideal de conforto térmico, seria a redução da temperatura do termostato do sistema de ar condicionado para 23°C no verão, reduzindo assim, a temperatura operativa.

Outra solução, porém, mais complexa, seria a redução da transmissão de calor através das paredes, visto que essa zona térmica conta com uma grande área superficial em contato com o meio externo. Tal solução poderia ser executada através da inserção de uma camada de isolamento térmico junto às paredes, gerando a redução do coeficiente global de transferência de calor das superfícies externas.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta a análise termoenergética do prédio administrativo da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete, empregando para simulação o *software* EnergyPlus e os dias de projeto segundo a ASHRAE (2013), com intuito de verificar o sistema de climatização instalado atualmente, propor melhorias na envoltória e um novo sistema de ar condicionado de maior eficiência. São comparados os consumos de energia elétrica entre o caso base e o caso proposto e o conforto térmico de uma zona representativa da edificação.

Atualmente a edificação conta com um sistema de ar condicionado do tipo *Split*, o qual conta com uma unidade condensadora e uma unidade evaporadora, onde pode-se verificar que as máquinas instaladas no térreo possuem em média 48% acima da potência ideal de aquecimento obtida via simulação. Já o segundo pavimento tem 15 zonas climatizadas, onde somente uma zona possui equipamento subdimensionado. No terceiro pavimento todas as máquinas estão superdimensionadas, com potências em média 35% a mais do que a necessária para aquecimento. Tais superdimensionamentos podem estar associados à alteração das salas da edificação, como é o caso das zonas 34 e 35, que em projeto formavam uma única sala, sendo esta segmentada em duas visando à otimização do espaço.

Tratando das melhorias na envoltória da edificação, foi proposta a substituição dos vidros simples instalados atualmente por vidros duplos, reduzindo o coeficiente global de transferência de calor destas superfícies, resultando numa redução média da potência do sistema de ar condicionado para o térreo em 13% para refrigeração e 19% para aquecimento. O segundo pavimento teve diminuições de 14% e 19,5% para refrigeração e aquecimento, respectivamente. Já para o terceiro pavimento, obteve-se uma redução média de 12% para refrigeração e 16% para aquecimento.

Baseado nas potências obtidas com as melhorias na envoltória, foi selecionado um sistema de ar condicionado do tipo Vazão de Refrigerante Variável (VRF), com 3 máquinas externas responsáveis por atenderem as máquinas internas de cada pavimento. Com essa proposta, foi obtida uma redução de 18,6% no consumo total de energia elétrica da edificação. Considerando somente os sistemas de aquecimento, refrigeração e ventilação, foram obtidas reduções de aproximadamente 71%, 47% e 80,5%, respectivamente, totalizando uma redução média de 55,2% no consumo de energia elétrica do sistema de climatização. Os resultados obtidos são coerentes com os trabalhos de Brasiliense (2012), Muller (2013) e Taube (2017), apresentando uma pequena diferença devido ao sistema de ar condicionado atual possuir potências superdimensionadas em média 33% acima da recomendada. Destaca-se também, que

o maior consumo de energia elétrica da edificação é devido aos equipamentos e o sistema de iluminação, semelhante ao trabalho de Carotenuto (2009).

Por fim, foi avaliado o conforto térmico da zona térmica 1, que representa a biblioteca do campus, escolhida por ser a zona mais representativa da edificação devido à grande ocupação e alta incidência solar nas fachadas leste e oeste. Constatou-se que na situação atual do prédio o PMV possui valores próximos a +0,9, não atendendo o valor recomendado por norma para conforto térmico. Após a substituição dos vidros, obteve-se uma redução da temperatura média radiante, devido à baixa transmissão solar e alta refletância do vidro duplo, ocasionando uma redução da temperatura operativa e do PMV, que para o caso proposto apresentou valores próximos a +0,8. Embora tenha ocorrido uma variação do PMV, este ainda não atende o especificado por norma, ficando com sugestão a redução da temperatura do termostato do ar condicionado para 23°C no verão ou a colocação de uma camada de isolamento térmico nas paredes em contato com o meio externo.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em relação aos trabalhos futuros, recomenda-se um estudo de viabilidade econômica das mudanças propostas para a envoltória da edificação e para a implantação do sistema de ar condicionado VRF. Aconselha-se a realização de novas simulações utilizando diferentes propostas de modificações, podendo ser a inserção de uma camada de isolamento térmico nas paredes da edificação que estão em contato com o meio externo, ou o emprego de um novo sistema de ar condicionado, tal como *Chillers* com expansão indireta em torre de resfriamento.

Sugere-se também, uma análise detalhada das cargas internas do prédio, buscando avaliar a eficiência energética dos equipamentos e a substituição do sistema de iluminação atual por um que utilize Diodos Emissores de Luz (LED), visto que estas parcelas da carga térmica interferem diretamente no sistema de ar condicionado e tem grande influência no consumo de energia elétrica.

9 REFERÊNCIAS

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, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2**: instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários, parte 2: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.

ASHRAE. **Climatic Design Conditions 2009/2013**. Disponível em <<http://ashrae-meteo.info/index.php>>. Acesso em: 20 de agosto de 2017.

ASHRAE. **Fundamentals Handbook**. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2005.

ASHRAE. **Fundamentals Handbook**. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2013.

BALTAR, Marcia Garcia. **Redução da Demanda de Energia Elétrica Utilizando Parâmetros Construtivos visando o Conforto Térmico**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

BRASILIENSE, Luciano Piccoli. **Simulação Termoenergética de uma Edificação em Proposição de Melhorias**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

CAROTENUTO, Adriano Roberto. **Análise do Desempenho Termoenergético de um Prédio Histórico de Elevada Inércia Térmica**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

ÇENGEL, Yunus Ali. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 3ª ed. São Paulo: Mc. Graw Hill, 2009.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Manual para Etiquetagem de Edificações Públicas**. Eletrobrás/Procel, 2014. Disponível em: < <https://>

www.comprasgovernamentais.gov.br/arquivos/sustentabilidade/manual_etiquet_edific_publicas_20141010.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2017.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Guia para Eficiência Energética nas Edificações Públicas**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documentos/10584/1985241/GUIA+EFIC+ENERG+EDIF+PUBL_1+0_12-02-2015_Compacta.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2017.

DA SILVA, Sérgio Augusto Ferrazza. **Análise do Desempenho Termoenergético das Edificações do Parque Científico e Tecnológico do Pampa (PAMPATEC) Através de Simulação com Software EnergyPlus**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 14/10**: avaliação da eficiência energética na indústria e residências no horizonte decenal (2010-2019). Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_4.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2017.

Energyplus. **Engineering Reference**. U.S Department of Energy. Washington, D.C.,2016.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de Conforto Térmico**. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GOOGLE. **Google Earth**. Versão 7.3.1.4507. 2018. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2018.

HELIOSCREEN. **Catálogo técnico de cortinas**. Lokeren, Bélgica, 2012. Disponível em: <http://www.helioscreen.com/media/7500/the_guide_2012-2015_lr.pdf>. Acesso em: 01 de novembro de 2017.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KOMEKO. **Manual de Instalação**, 2013.

LABEEE. **Arquivos climáticos**. 2016. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso: 20 de agosto de 2017.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel, 2014.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **International Glazing Database**. Versão 60. Berkeley, USA, 2018.

MEMORIAL DESCRITIVO: Memorial Descritivo do Prédio Administrativo da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

MIDEA. **Catálogo de produtos**, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia prático de eficiência energética:** reunindo a experiência prática do projeto de etiquetagem. 1ª ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014.

MÜLLER, Rafael Walter. **Estudo da Eficiência Energética e Conforto Térmico de um Prédio Universitário Via Simulação com EnergyPlus**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

PROJETO ARQUITETÔNICO: Projeto Arquitetônico do Prédio Administrativo da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO: Projeto de Climatização do Prédio Administrativo da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

PROJETO ELÉTRICO: Projeto Elétrico de Climatização do Prédio Administrativo da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

PROJETO ESTRUTURAL: Projeto Estrutural do Prédio Administrativo da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

SAINT-GOBAIN. **Catálogo de Vidros Duplos**. 2015. Disponível em: <<http://arquitectura.pt.saint-gobain.com/wp-content/uploads/2015/08/catalogo-climalit-plus.pdf>>. Acesso em: 08 de abril de 2018.

SPRINGER. **Manual de Instalação, Operação e Manutenção**, 2008.

STEIN, Tiago Silva. **Impacto das Soluções de Arquitetura e Climatização no Consumo de Energia de uma Edificação**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

TAUBE, Gabriel Engers. **Análise do Desempenho Termoenergético do Prédio NTIC da Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2017.

TRAME. **Cooling and Heating Load Estimation**. 2011. Disponível em: <<http://www.tga-optimierung.de/kaeltetechnik/wp-content/uploads/sites/2/2015/07/Cooling-and-Heating-Load-Estimation.pdf>>. Acesso em: 25 de junho de 2017.

VIANA, Augusto; BORTONI, Edson; NOGUEIRA, Fábio; HADDAD, Jamil; NOGUEIRA, Luiz; VENTURINI, Osvaldo; YAMACHITA, Roberto. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. Campinas, 2012.

APÊNDICES

A – Descrição das Zonas Térmicas

O Quadro A.1 apresenta uma descrição de cada zona térmica da edificação.

Quadro A.1 - Descrição das zonas térmicas da edificação

Zona Térmica	Descrição	Zona Térmica	Descrição
1	Biblioteca	34	STIC
2	Sala Administrativa da Biblioteca	35	Secretaria Administrativa
3	Banheiro	36	Sala dos Professores
4	Banheiro	37	Sala dos Professores
5	Banheiro	38	Sala dos Professores
6	Banheiro	39	Sala dos Professores
7	Escadas	40	Sala dos Professores
8	Circulação	41	Sala dos Professores
9	Secretaria Acadêmica	42	Sala dos Professores
10	Arquivo	43	Sala dos Professores
11	Copa	44	Banheiro
12	Sala de Micrografia	45	Banheiro
13	Sala de Pós-graduação	46	Banheiro
14	Sala de Apoio Estudantil	47	Banheiro
15	Sala de Apoio Estudantil	48	Circulação
16	Sala dos Professores	49	Sala dos Professores
17	Sala dos Professores	50	Sala dos Professores
18	Sala dos Professores	51	Sala dos Professores
19	Sala dos Professores	52	Sala dos Professores
20	Sala dos Professores	53	Sala dos Professores
21	Sala dos Professores	54	Sala dos Professores
22	Sala dos Professores	55	Sala dos Professores
23	Sala dos Professores	56	Sala dos Professores
24	Banheiro	57	Sala dos Professores
25	Banheiro	58	Telhado
26	Banheiro	59	Telhado
27	Banheiro	60	Telhado
28	Circulação	61	Telhado
29	Recepção da Sala da Direção	62	Telhado
30	Sala da Direção	63	Telhado
31	Sala dos Professores	64	Telhado
32	Sala dos Professores	65	Telhado
33	Sala de Reuniões/Coordenador Acadêmico	66	Telhado

B – Potências Ideais de Refrigeração e Aquecimento

A Tabela B.1 exiba as potências ideais de refrigeração e aquecimento e seus respectivos dias de projeto.

Tabela B.1 - Potências ideais de refrigeração e aquecimento

Zona	Potências [W]		Vazão [m ³ /s]	Dia de projeto	Data - Hora
	Refrigeração	Aquecimento			
1	13082,7	20370,3	0,804	Tbs	21/07 - 8:00 h
2	3452,13	2649,92	0,144	Tbu	22/12 - 8:00 h
9	8489,89	6141,84	0,336	Tbu	22/02 - 8:00 h
12	3397,32	4835,18	0,138	Tbs	21/07 - 8:00 h
13	3570,84	5980,71	0,198	Tbs	21/07 - 8:00 h
14	2060,01	3319,88	0,135	Tbs	21/07 - 8:00 h
15	2955,67	4503,76	0,182	Tbs	21/07 - 8:00 h
16	2460,94	4444,04	0,148	Tbs	21/07 - 8:00 h
17	3463,1	4479,62	0,144	Tbs	21/07 - 8:00 h
18	2855,98	3067,57	0,17	Tbs	21/07 - 8:00 h
19	4211,4	3132,47	0,175	Tbu	22/01 - 8:00 h
20	2883,47	3064,62	0,17	Tbs	21/07 - 8:00 h
21	2917,91	2323,26	0,121	Tbu	22/01 - 8:00 h
22	3043,26	2375,77	0,133	Tbu	22/01 - 8:00 h
23	2756,65	3910,8	0,165	Tbs	21/07 - 8:00 h
29	4831,27	3431,44	0,213	Tbu	22/03 - 8:00 h
30	5033,33	4239,21	0,198	Tbu	22/01 - 8:00 h
31	4502,91	2946,42	0,188	Tbu	22/01 - 8:00 h
32	4305,55	2814,39	0,182	Tbu	22/01 - 8:00 h
33	3131,73	4952,11	0,142	Tbs	21/07 - 8:00 h
34	4079,44	4429,6	0,242	Tbs	21/07 - 8:00 h
35	11275,7	5915,76	0,577	Tbu	22/02 - 8:00 h
36	2731,87	4522,87	0,153	Tbs	21/07 - 8:00 h
37	3587,12	4570,06	0,142	Tbs	21/07 - 8:00 h
38	2882,37	3307,2	0,161	Tbs	21/07 - 8:00 h
39	4011,49	3392,55	0,158	Tbu	22/01 - 8:00 h
40	2896,73	3297,44	0,160	Tbs	21/07 - 8:00 h
41	2789,64	2521,06	0,112	Tbu	22/01 - 8:00 h
42	2932,65	2572,71	0,121	Tbu	22/02 - 8:00 h
43	2787,44	4145,84	0,164	Tbs	21/07 - 8:00 h
49	8679,31	5903,46	0,350	Tbu	22/12 - 8:00 h
50	2695,21	2291,6	0,108	Tbu	22/02 - 8:00 h
51	2752,72	2454,25	0,111	Tbu	22/02 - 8:00 h
52	4003,48	3379,02	0,158	Tbu	22/02 - 8:00 h
53	3278,49	4738,64	0,134	Tbs	21/07 - 8:00 h
54	2628,63	4702,36	0,164	Tbs	21/07 - 8:00 h
55	2900,89	3321,75	0,160	Tbs	21/07 - 8:00 h
56	2942,42	3323,58	0,163	Tbs	21/07 - 8:00 h
57	2763,33	4203,12	0,151	Tbs	21/07 - 8:00 h

C – Potências Ideais para a Nova Configuração de Envoltória

A Tabela C.1 mostra as potências ideais de refrigeração e aquecimento para a nova configuração de envoltória da edificação.

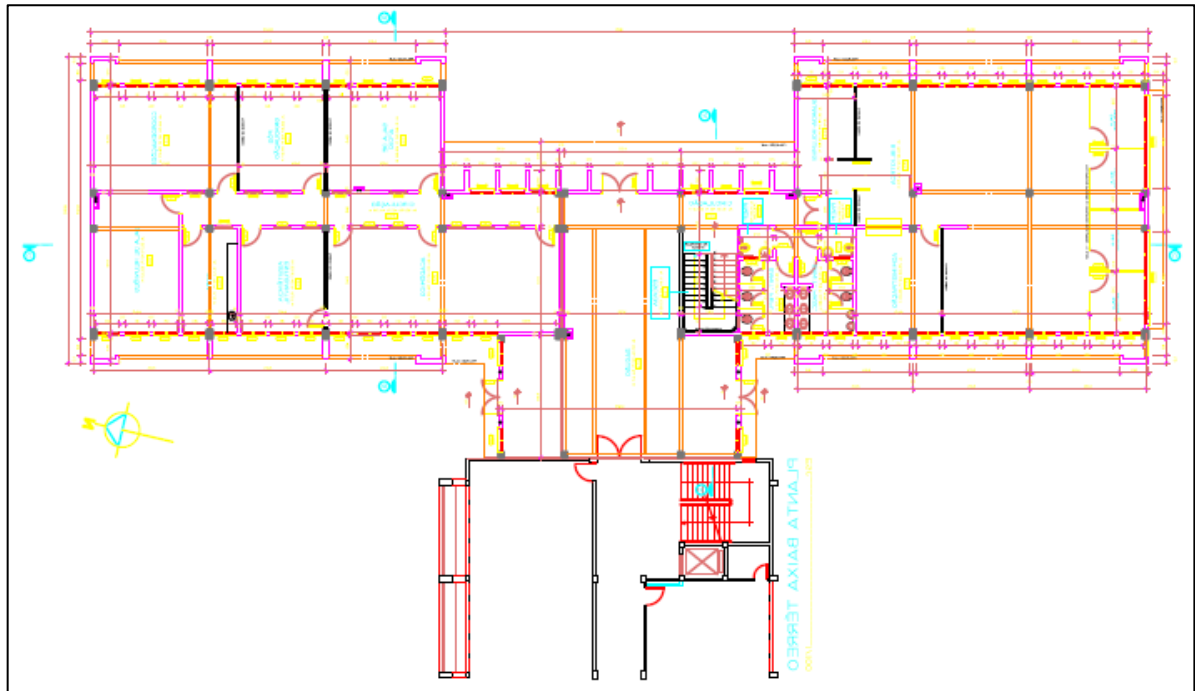
Tabela C.1 - Potências para a nova configuração da envoltória

Zona	Potências [W]		Vazão [m ³ /s]	Dia de projeto	Data - Hora
	Refrigeração	Aquecimento			
1	12061,5	14933,1	0,642	Tbs	21/07 - 8:00 h
2	2778,69	1976,04	0,11	Tbu	22/12 - 8:00 h
9	7091,52	4907,65	0,273	Tbu	22/01 - 8:00 h
12	2978,12	4243,49	0,117	Tbs	21/07 - 8:00 h
13	3031,39	5090,71	0,157	Tbs	21/07 - 8:00 h
14	1785,94	2660,51	0,102	Tbs	21/07 - 8:00 h
15	2715,51	3829,06	0,149	Tbs	21/07 - 8:00 h
16	2302,99	3928,88	0,121	Tbs	21/07 - 8:00 h
17	3004,25	3962,54	0,123	Tbs	21/07 - 8:00 h
18	2466,03	2364,38	0,128	Tbu	22/02 - 8:00 h
19	3439,53	2431,9	0,136	Tbu	22/01 - 8:00 h
20	2485,27	2358,62	0,128	Tbu	22/02 - 8:00 h
21	2350,87	1811,59	0,093	Tbu	22/01 - 8:00 h
22	2486,09	1874,06	0,103	Tbu	22/01 - 8:00 h
23	2468,25	3376,44	0,134	Tbs	21/07 - 8:00 h
29	3912,39	2726,48	0,161	Tbu	22/03 - 8:00 h
30	3992,33	3346,43	0,153	Tbu	22/01 - 8:00 h
31	3719,31	2233,69	0,148	Tbu	22/01 - 8:00 h
32	3616,28	2143,71	0,146	Tbu	22/01 - 8:00 h
33	2695,83	4392,57	0,125	Tbs	21/07 - 8:00 h
34	3872,41	3740,04	0,207	Tbu	22/03 - 8:00 h
35	10667,6	4234,63	0,495	Tbu	22/02 - 8:00 h
36	2618,02	4058,89	0,133	Tbs	21/07 - 8:00 h
37	3220,84	4101,51	0,127	Tbs	21/07 - 8:00 h
38	2552,45	2673,39	0,127	Tbs	21/07 - 8:00 h
39	3368,93	2750,43	0,132	Tbu	22/02 - 8:00 h
40	2573,23	2670,47	0,127	Tbs	21/07 - 8:00 h
41	2311,98	2051,44	0,092	Tbu	22/01 - 8:00 h
42	2467,97	2113,33	0,100	Tbu	22/02 - 8:00 h
43	2531,89	3649,99	0,137	Tbs	21/07 - 8:00 h
49	7239,6	4693,43	0,284	Tbu	22/12 - 8:00 h
50	2258,02	1825,51	0,090	Tbu	22/02 - 8:00 h
51	2286,99	1984,3	0,091	Tbu	22/02 - 8:00 h
52	3370,15	2738,27	0,132	Tbu	22/02 - 8:00 h
53	2979,76	4268,2	0,121	Tbs	21/07 - 8:00 h
54	2528,17	4235,23	0,143	Tbs	21/07 - 8:00 h
55	2591,36	2697,16	0,128	Tbs	21/07 - 8:00 h
56	2606,67	2686,41	0,128	Tbs	21/07 - 8:00 h
57	2512,34	3709,05	0,126	Tbs	21/07 - 8:00 h

ANEXOS

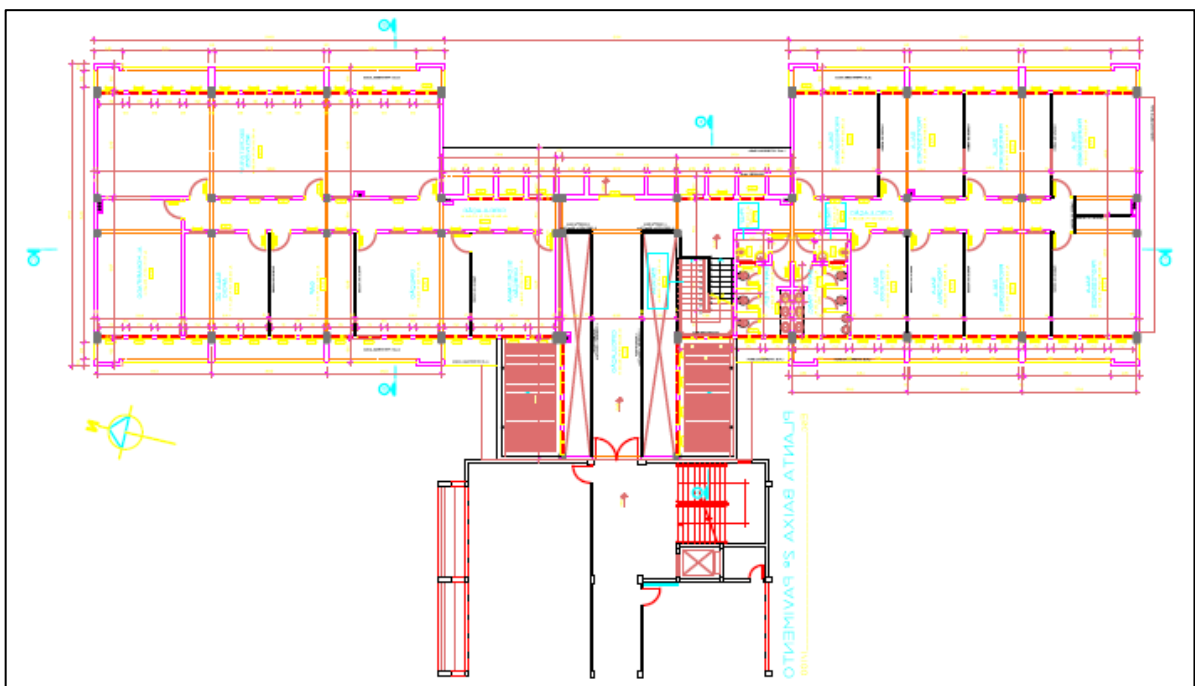
1 – Plantas Baixas e Cortes

Figura 1.A - Planta baixa térreo



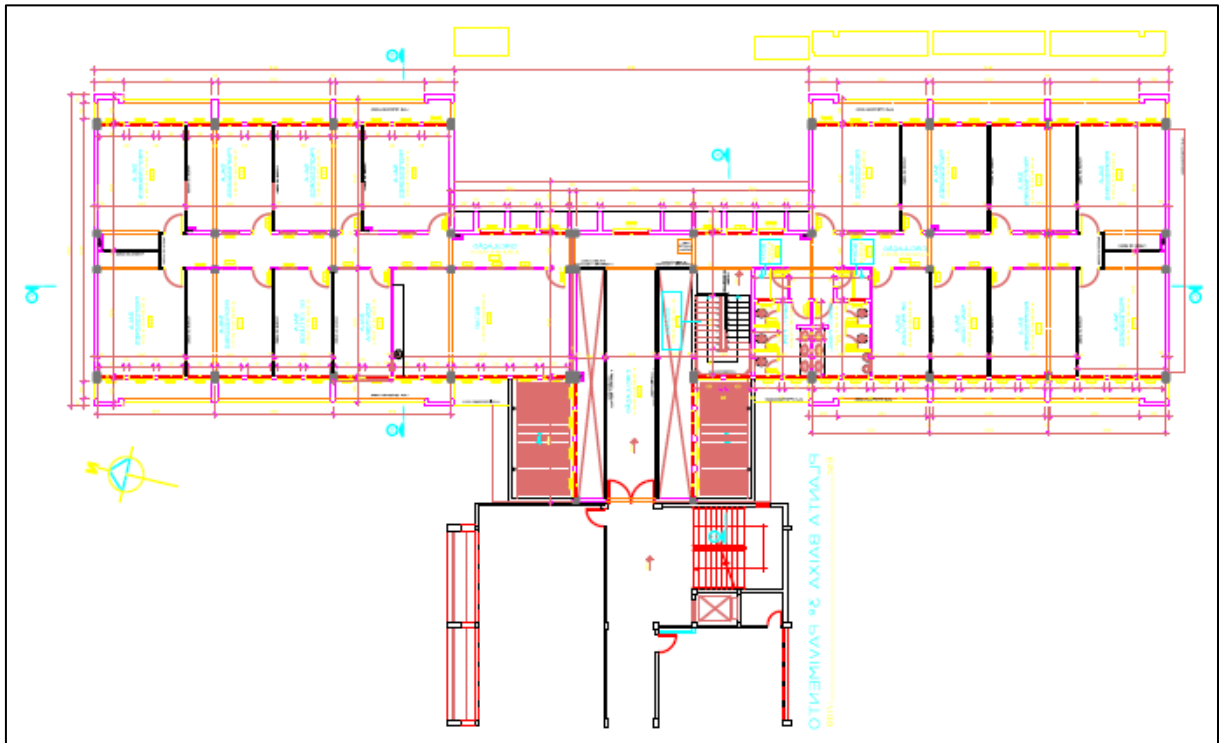
Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.B - Planta baixa segundo pavimento



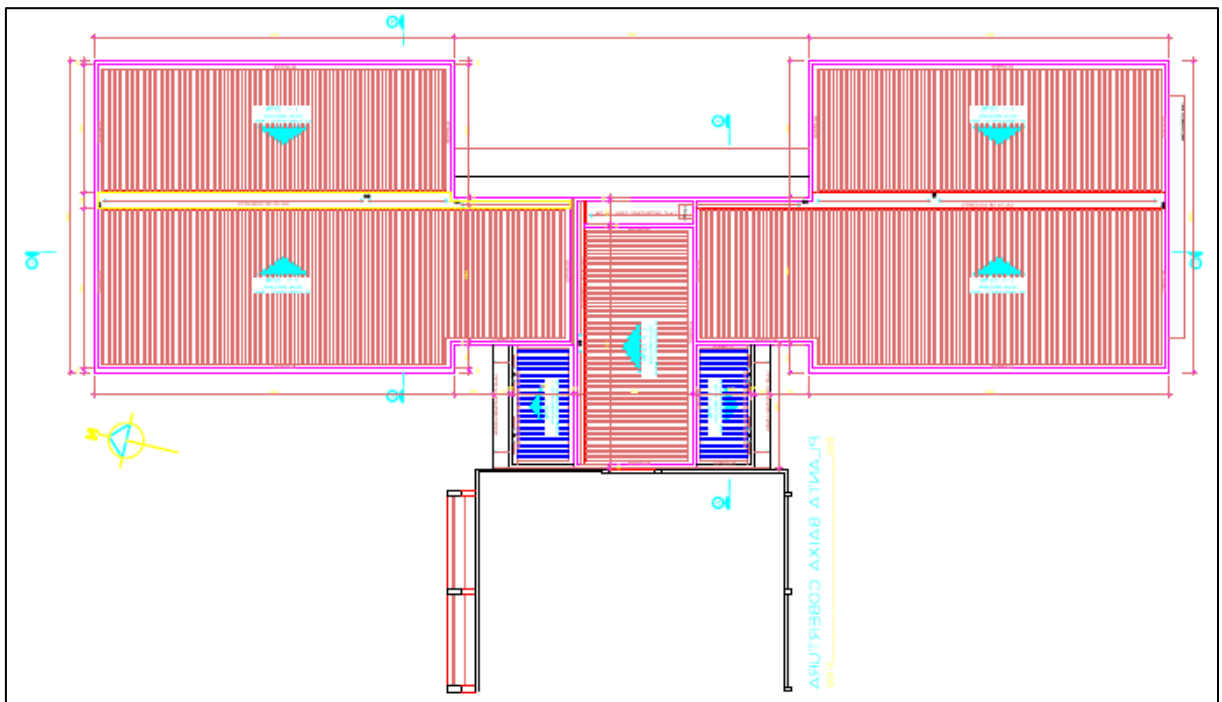
Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.C - Planta baixa terceiro pavimento



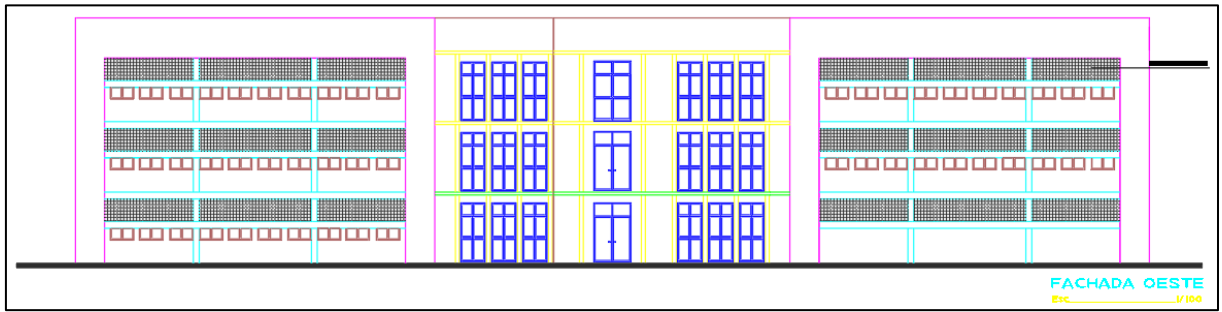
Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.D - Planta baixa da cobertura



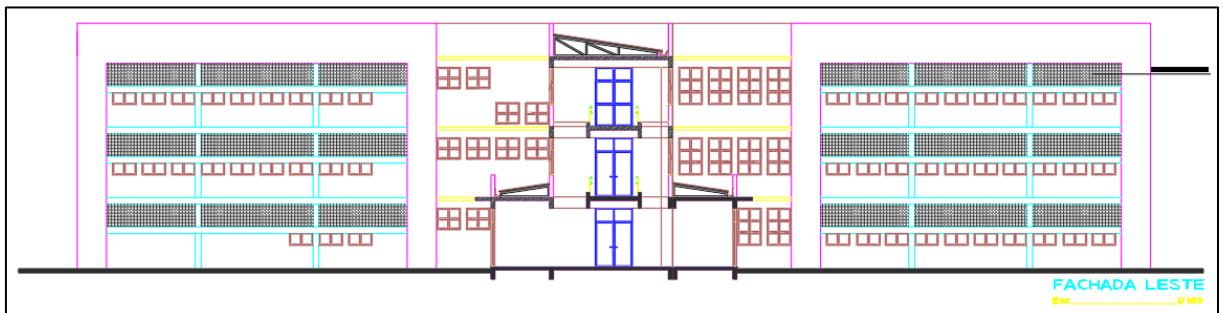
Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.E - Fachada Oeste



Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.F - Fachada leste



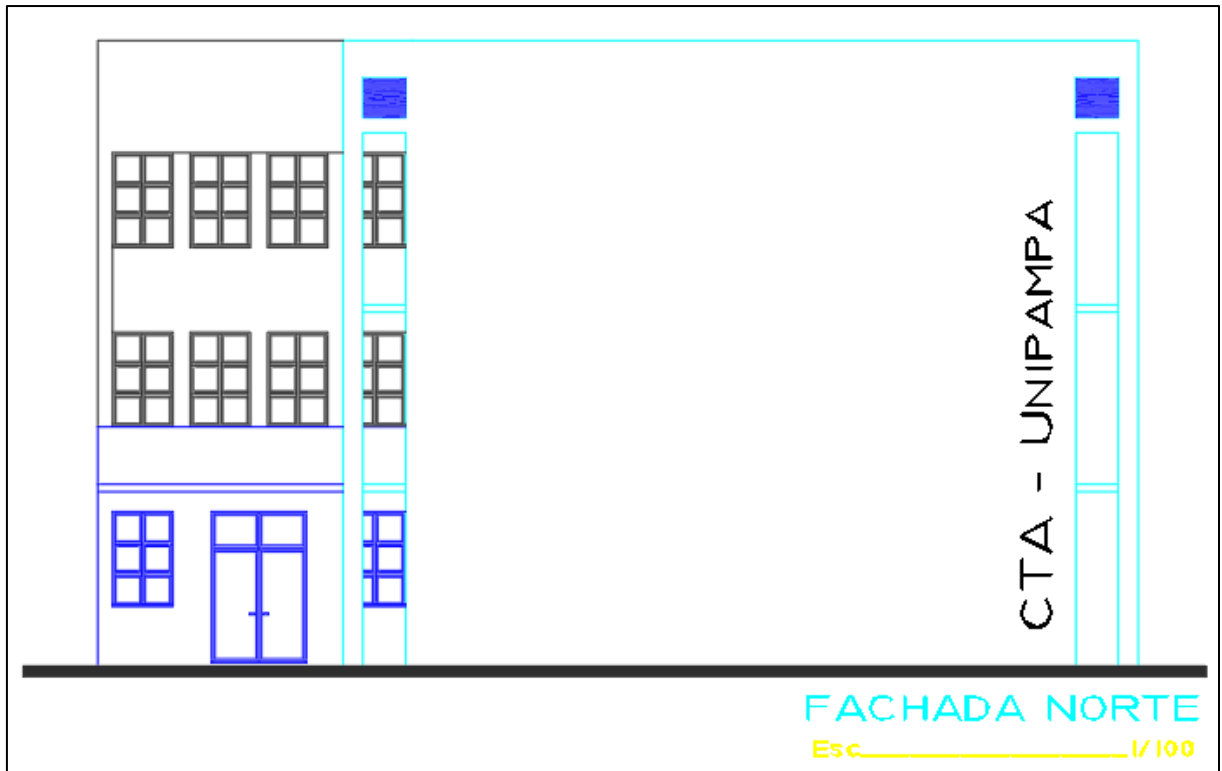
Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.G - Fachada sul



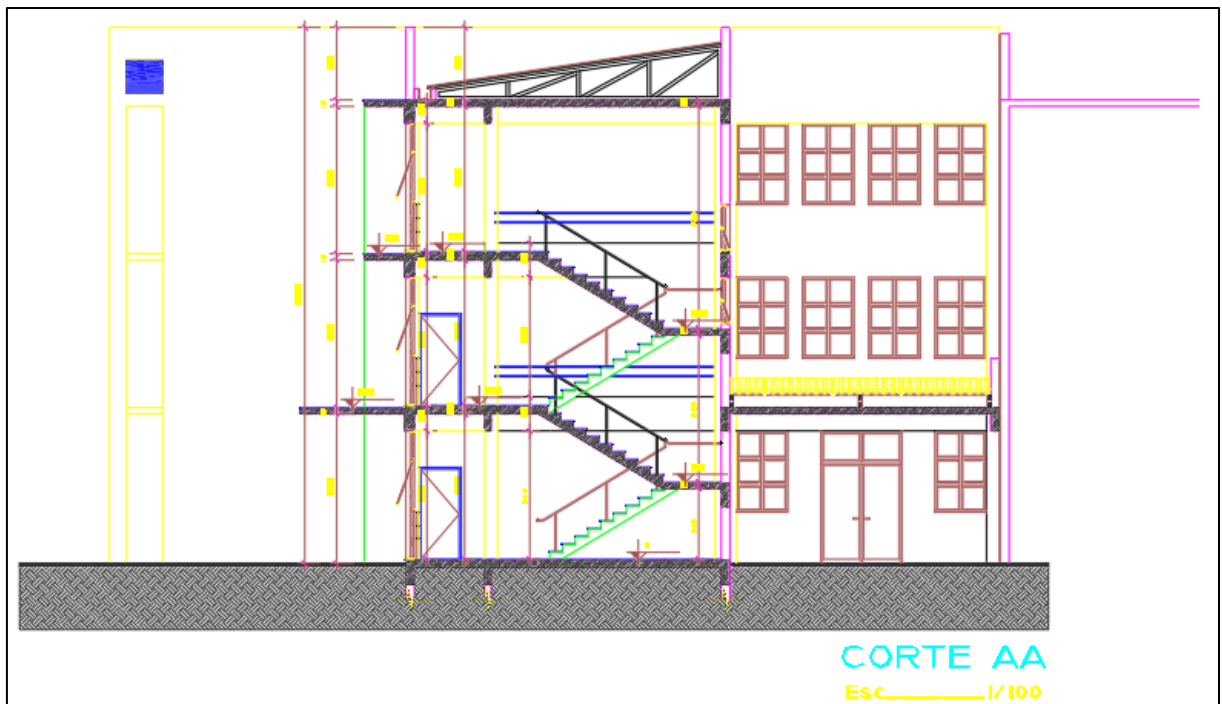
Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.H - Fachada norte



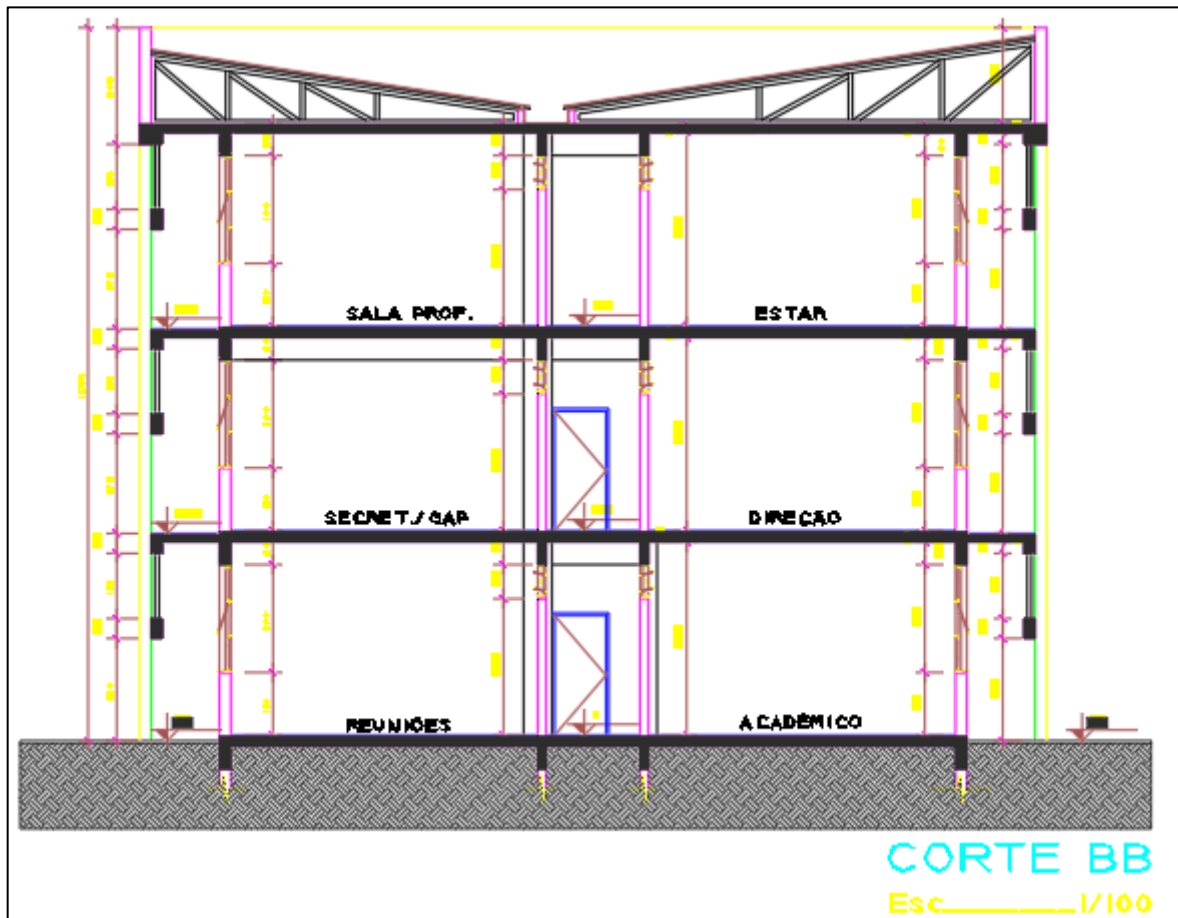
Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.I - Corte A-A



Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.J - Corte B-B



Fonte: Projeto arquitetônico.

Figura 1.K - Corte C-C



Fonte: Projeto arquitetônico.

2 – Potências das Máquinas *Split* Instaladas Atualmente

A Tabela 2.A apresenta as potências de refrigeração e aquecimento das máquinas *Split* instaladas atualmente na edificação. As potências serão consideradas iguais baseadas nas capacidades nominais informadas pelos catálogos técnicos dos fabricantes.

Tabela 2.A - Potências de refrigeração e aquecimento instaladas atualmente

Zona	Potências [W]		Vazão [m ³ /s]
	Refrigeração	Aquecimento	
1	28134,83	28134,83	0,889
2	5421,82	5421,82	0,228
9	12455,53	12455,53	0,474
12	10550,56	10550,56	0,319
13	10550,56	10550,56	0,319
14	7033,71	7033,71	0,246
15	10550,56	10550,56	0,319
16	7033,71	7033,71	0,246
17	5421,82	5421,82	0,228
18	5421,82	5421,82	0,228
19	5421,82	5421,82	0,228
20	5421,82	5421,82	0,228
21	3516,86	3516,86	0,161
22	3516,86	3516,86	0,161
23	7033,71	7033,71	0,246
29	7033,71	7033,71	0,246
30	10550,56	10550,56	0,319
31	5421,82	5421,82	0,228
32	5421,82	5421,82	0,228
33	3516	3516	0,135
34	14067,42	14067,42	0,444
35	14067,42	14067,42	0,444
36	7033,71	7033,71	0,246
37	5421,82	5421,82	0,228
38	5421,82	5421,82	0,228
39	5421,82	5421,82	0,228
40	5421,82	5421,82	0,228
41	3516,86	3516,86	0,161
42	3516,86	3516,86	0,161
43	7033,71	7033,71	0,246
49	14067,42	14067,42	0,444
50	3516,86	3516,86	0,161
51	3516,86	3516,86	0,161
52	5421,82	5421,82	0,228
53	5421,82	5421,82	0,228
54	7033,71	7033,71	0,246
55	5421,82	5421,82	0,228
56	5421,82	5421,82	0,228
57	7033,71	7033,71	0,246

Fonte: Projeto de climatização, Springer (2008) e Komeco (2013).

3 – Máquinas Internas VRF

A Tabela 3.A apresenta as unidades internas do sistema VRF selecionadas através do catálogo de um fabricante.

Tabela 3.A – Informações técnicas das unidades internas VRF

Zona Térmica	Modelo	Potências [W]		Vazão [m ³ /s]
		Refrigeração	Aquecimento	
1	MI-71G/DHN1-M	7100	8000	0,332
	MI-80G/DHN1-M	8000	9000	0,332
2	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,116
9	MI-71G/DHN1-M	7100	8000	0,332
12	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
13	MI-56G/DHN1-M	5600	6300	0,2075
14	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,116
15	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
16	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
17	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
18	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
19	MI-36G/DHN1-M	3600	4000	0,182
20	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
21	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
22	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
23	MI-36G/DHN1-M	3600	4000	0,182
29	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
30	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
31	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
32	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
33	MI-71G/DHN1-M	7100	8000	0,332
34	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
35	MI-112DL/DHN1-C	11200	12500	0,525
36	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
37	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,182
38	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
39	MI-36G/DHN1-M	3600	4000	0,182
40	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
41	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
42	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
43	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
49	MI-80G/DHN1-M	8000	9000	0,332
50	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
51	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
52	MI-36G/DHN1-M	3600	4000	0,182
53	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
54	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165
55	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
56	MI-28G/DHN1-M	2800	3200	0,115
57	MI-45G/DHN1-M	4500	5000	0,165

Fonte: Midea (2018).