

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS SANTA MARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Becker Moreira

**ESTUDO DE CASO - VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO SISTEMA
DE CLIMATIZAÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO DE ENSINO**

Santa Maria, RS

2022

Guilherme Becker Moreira

**ESTUDO DE CASO - VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO SISTEMA DE
CLIMATIZAÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO DE ENSINO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS), como requisito parcial
para obtenção do grau de **Engenheiro
Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Diego Berlezi Ramos

Santa Maria, RS

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Alex e Elisângela, que sempre ofereceram suporte em todas minhas escolhas.

Agradeço a todo colega e amigo que ao longo desta jornada colocou um sorriso no meu rosto.

Agradeço a todos professores que contribuíram para minha formação como engenheiro e como pessoa.

Agradeço ao amor da minha vida, que estará lendo isso no futuro.

RESUMO

ESTUDO DE CASO - VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO DE ENSINO

AUTOR: Guilherme Becker Moreira

ORIENTADOR: Diego Berlezi Ramos

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre o dimensionamento e a escolha de um sistema de climatização ideal para uma edificação de ensino superior, visando o conforto térmico e a eficiência energética. Os dimensionamentos foram realizados de acordo com os resultados obtidos através de simulações computacionais referentes a incidência de carga térmica nos ambientes avaliados, onde foi verificada a viabilidade de mudanças na infraestrutura do local a fim de reduzir a potência de climatização necessária. Foram dimensionados um sistema baseado em equipamentos do tipo Split, um sistema com fluxo de refrigerante variável (VRV) e um sistema VRV em conjunto com a redução da altura das salas a serem climatizadas. Com as características dos equipamentos projetados comparou-se o consumo energético e a viabilidade econômica entre as alternativas, onde concluiu-se que, no cenário econômico atual (devido ao alto custo dos equipamentos e alta taxa de inflação), não é economicamente vantajoso a substituição dos equipamentos atualmente instalados, apesar disso as alternativas propostas resultaram em uma acentuada redução no consumo de energia elétrica.

Palavras-chave: Climatização. Eficiência Energética. Carga Térmica.

ABSTRACT

ESTUDO DE CASO - VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO DE ENSINO

AUTHOR: Guilherme Becker Moreira

ADVISOR: Diego Berlezi Ramos

This work presents a case study on the design and choice of an appropriate air conditioning system for an educational building, aiming at thermal comfort and energy efficiency. The sizing was accomplished according to the results obtained through computer simulations regarding the incidence of thermal load in the evaluated environments, It was also verified the feasibility of changes in the infrastructure of the place in order to reduce the necessary air conditioning power. Three different systems were evaluated: a Split System based on split-type equipment, a system with variable refrigerant flow (VRV) and a VRV system designed in conjunction with the reduction of the height of the rooms to be air-conditioned. With the characteristics of the designed systems, a comparison was made between energy consumption and economic viability between the alternatives, where it was concluded that in the current economic scenario (due to the high equipment cost and high inflation rate) it is not economically advantageous to replace the equipment, however the proposed alternatives resulted in a marked reduction in the consumption of electric energy.

Keywords: Air-conditioning. Energy efficiency. Thermal load.

1. LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Layout Openstudio.....	26
Figura 2: Aba Weather – Openstudio.....	27
Figura 3: Aba Schedules - sub-aba Schedules Sets – Openstudio.....	28
Figura 4: Aba Schedules - sub-aba Schedules – Openstudio.....	29
Figura 5: Aba Constructions - sub-aba Materials – Openstudio.....	30
Figura 6: Aba Constructions - sub-aba Constructions – Openstudio.....	30
Figura 7: Aba Constructions - sub-aba Constructions Sets – Openstudio.....	31
Figura 8: Aba Loads - Ocupação das salas (número de pessoas) - Openstudio.....	32
Figura 9: Aba Loads - Carga de iluminação (potência elétrica destinada a iluminação) - Openstudio.....	32
Figura 10: Aba Space Types - sub-aba General - Openstudio.....	33
Figura 11: Aba Space Types - sub-aba Loads - Openstudio.....	34
Figura 12: Aba Spaces - sub-aba Properties – Openstudio.....	35
Figura 13: Aba Spaces - sub-aba Loads – Openstudio.....	35
Figura 14: Aba Spaces - sub-aba Surfaces - Openstudio.....	36
Figura 15: Aba Thermal Zones – Openstudio.....	36
Figura 16: Aba HVAC Systems – Openstudio.....	37
Figura 17: Aba Output Variables – Openstudio.....	38
Figura 18: Aba Simulation Settings – Openstudio.....	39
Figura 19: Aba Measures - Layout geral – Openstudio.....	40
Figura 20: Aba Measures - Janela de importação do BCL – Openstudio.....	40
Figura 21: Aba Run Simulation - Openstudio.....	41
Figura 22: Relatório de resultados - Openstudio.....	42
Figura 23: Relatório de resultados - Energyplus.....	42
Figura 24: Resultados tabelados e graficos referente ao consumo anual total de energia - Openstudio.....	43
Figura 25: Resultados tabelados e graficos referente ao consumo mensal de energia - Openstudio.....	43

Figura 26: Resultados tabelados e graficos referente ao consumo de energia destinada a climatização (aquecimento e arrefecimento) e temperatura ambiente externa - Openstudio.....	44
Figura 27: Condição de temperatura ao longo do ano por zona térmica (número de horas em determinado range de temperatura) - Openstudio.....	44
Figura 28: Layout geral com destaque para a barra de ferramentas padrão e a barra de ferramentas adicionada pela extensão do OpenStudio - SketchUp.....	45
Figura 29: Menu de edição de spaces - SketchUp.....	46
Figura 30: Menu de edição de Superficies - SketchUp.....	47
Figura 31: Menu de modificação de fatores de um espaço - SketchUp.....	47
Figura 32: Edificação modelada no software - SketchUp.....	48
Figura 33: Visualização por zona térmica - SketchUp.....	48
Figura 34: Visualização de sombreamento - SketchUp.....	49
Figura 35: Anexo C - Fachada leste/sul.....	57
Figura 36: Anexo C - Fachada norte/oeste.....	58
Figura 37: Temperatura ambiente anual na cidade de Santa Maria – RS.....	59
Figura 38: Schedule de horário de ocupação em salas de aulas e salas de professores	61
Figura 39: Schedule de nível de atividade em salas de professores.....	62
Figura 40: Cargas cadastradas para salas de professores, número de ocupantes, equipamentos elétricos, infiltração e iluminação e vazão de ar.....	62
Figura 41: Vista frontal e traseira- Anexo C - Indicação de zonas térmicas.....	66
Figura 42: Temperatura interna das salas obtida na simulação sem sistema de climatização.....	68
Figura 43: Schedules de pontos de ajuste das temperaturas dos termostatos.....	69
Figura 44: Temperatura interna das salas obtida na simulação com sistema de climatização.....	70
Figura 45: Cadastro dos vidros utilizados na análise de sensibilidade.....	73
Figura 46: Substituição do tipo de vidro utilizado na edificação.....	74

Figura 47: Grafico de carga térmica de aquecimento requerida para climatização das zonas térmicas por cenário avaliado.....	79
Figura 48: Gráfico de carga térmica de refrigeração requerida para climatização das zonas térmicas por cenário avaliado.....	79

2. LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Eficiência Mínima para equipamentos de climatização.....	15
Tabela 2: Fluxo de ar externo de acordo com o tipo de abertura.....	17
Tabela 3: Calor típico gerado pelo metabolismo de acordo com a atividade exercida de (AHRAE Fundamentals) e a atividade semelhante apresentada na NBR 16401.....	18
Tabela 4: Taxa típica de dissipação de calor por iluminação de acordo com a finalidade do ambiente.....	19
Tabela 5: Taxa típica de dissipação de calor em equipamentos de escritório.....	19
Tabela 6: Densidade de carga típica para escritórios de acordo com a concentração de postos de trabalho, considerando um computador e um monitor por posto de trabalho mais uma <i>impressora</i> e fax.....	19
Tabela 7: Vazão de ar eficaz de acordo com o tipo de ambiente e o nível de vazão desejado.....	20
Tabela 8: Eficiência e classificação de filtros de partículas.....	21
Tabela 9: Classe de filtro a ser utilizada de acordo com a utilização do ambiente.....	21
Tabela 10: Faixa de temperatura onde o conforto térmico é atingido.....	22
Tabela 11: Propriedades térmicas de materiais usualmente utilizado em construções de acordo com NBR 15220.....	24
Tabela 12: Etapas a serem realizadas.....	53
Tabela 13: Ocupação, <i>horário</i> de uso e calor gerado por tipo de atividade de cada ambiente.....	60
Tabela 14: potência dissipada por iluminação e por equipamentos elétricos por sala....	63
Tabela 15: Infiltração de ar por tipo de abertura.....	63
Tabela 16: Características construtivas paredes e telhados.....	64
Tabela 17: Coeficientes do vidro claro.....	64
Tabela 18: Fator de vazão por pessoa e por área de acordo com a finalidade da sala..	65
Tabela 19: Especificação de zonas térmicas.....	67
Tabela 20: Pico de demanda térmica por setor avaliado (Caso base).....	70

Tabela 21: Potência térmica demandada para climatização de determinadas salas (Caso base).....	71
Tabela 22: Coeficientes de interesse para os vidros refletor e absorvente.....	72
Tabela 23: Características construtivas de telhados após o rebaixamento.....	75
Tabela 24: Pico de demanda térmica por setor avaliado (com a redução do pé-direito)	75
Tabela 25: Potência térmica demandada para climatização de determinadas salas (com a redução do pé-direito).....	76
Tabela 26: Potência térmica máxima requerida para climatização por zona térmica.....	77
Tabela 27: Consumo mensal de energia estimado para refrigeração e para aquecimento	78
Tabela 28: Carga térmica mensal total (aquecimento e refrigeração) por cenário avaliado.....	78
Tabela 29: Extrapolação dos resultados de simulação individual das salas de aula para as demais salas de aula da edificação.....	81
Tabela 30: Relação entre potência real e ideal de climatização para as salas de aula do edifício avaliado e opções para adequação.....	83
Tabela 31: Características dos sistemas VRV's projetados.....	85
Tabela 32: Equipamentos instalados e investimento inicial necessário em cada cenário avaliado.....	86
Tabela 33: Comparação entre carga instalada (kW) e consumo anual (kWh/ano) em cada cenário.....	88
Tabela 34: Análise econômica das soluções propostas.....	88
Tabela 35: Potência de refrigeração de equipamentos de ar-condicionado instalados em diferentes salas do Centro de Tecnologia comparado com o valor ideal obtido através de simulação Tabela 21.....	92

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
1.2. JUSTIFICATIVA.....	12
1.3. OBJETIVOS.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. INTRODUÇÃO.....	13
2.2. REVISÃO NORMATIVA.....	13
2.2.1. Carga térmica.....	14
2.2.2. Renovação de ar.....	17
2.3. CONFORTO TÉRMICO.....	19
2.4. GRANDEZAS FUNDAMENTAIS.....	20
2.5. RECURSOS COMPUTACIONAIS.....	23
2.5.1. OpenStudio.....	23
2.5.1.1. Weather.....	24
2.5.1.2. Schedules.....	25
2.5.1.3. Constructions.....	27
2.5.1.4. Loads.....	29
2.5.1.5. Space Types.....	31
2.5.1.6. Geometry.....	32
2.5.1.7. Facility.....	32
2.5.1.8. Spaces.....	32
2.5.1.9. Thermal Zones.....	34
2.5.1.10. HVAC Systems.....	35
2.5.1.11. Output Variables.....	36
2.5.1.12. Simulation Settings.....	37
2.5.1.13. Measures.....	37
2.5.1.14. Run Simulation.....	39
2.5.1.15. Results Summary.....	39

2.5.2. SketchUp.....	42
2.6. ANÁLISE ECONOMICA.....	47
2.7. SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO.....	49
2.7.1. Sistema Split.....	49
2.7.2. Sistema VRV.....	50
3. METODOLOGIA.....	50
3.1. ETAPAS DO PROJETO.....	51
3.1.1. Modelagem 3D.....	51
3.1.2. Modelagem de carga.....	51
3.1.3. Definição de zonas térmicas.....	52
3.1.4. Simulação do caso base.....	52
3.1.5. Simulação com sistema de climatização.....	52
3.1.6. Análise de sensibilidade.....	52
3.1.6.1. Substituição dos vidros de janelas por vidros absorventes;.....	53
3.1.6.2. Substituição dos vidros de janelas por vidros refletores;.....	53
3.1.6.3. Redução do pé-direito de 360 cm para 260 cm.....	53
3.1.7. Análise econômica.....	54
3.2. MODELAGEM 3D.....	54
3.3. MODELAGEM DE CARGA.....	55
3.3.1. Dados climatológicos.....	55
3.3.2. Ocupação das salas.....	56
3.3.3. Iluminação e equipamentos elétricos.....	60
3.3.4. Infiltração.....	60
3.3.5. Características construtivas.....	61
3.3.6. Renovação de ar.....	62
3.4. DETERMINAÇÃO DE ZONAS TÉRMICAS.....	63
3.5. SIMULAÇÃO DO CASO BASE.....	64
3.6. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO.....	65
3.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	68
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	72

4.1. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS.....	72
4.2. ADEQUAÇÃO DO SISTEMA ATUAL.....	76
4.3. DETERMINAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	80
4.4. COMPARAÇÃO ECONÔMICA.....	83
5. CONCLUSÃO.....	84
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXO A - Levantamento de equipamentos instalados.....	88

3. INTRODUÇÃO

3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O conforto térmico é uma condição essencial para desempenho acadêmico e profissional. Diversos estudos destacam a relação entre um ambiente corretamente climatizado e o aumento da produtividade (AKIMOTO et al., 2010; BATIZ et al., 2009; NICO; LIUZZI; STEFANIZZI, 2015).

Em uma universidade, onde o principal produto é a disseminação do conhecimento, os cuidados com o conforto térmico devem ser redobrados, visto que a sua ausência ocasiona dificuldade de concentração que prejudica a capacidade de raciocínio e aprendizado dos alunos.

Contudo, o uso de equipamentos de condicionamento de ar ocasiona custos devido ao consumo de energia. O incorreto dimensionamento deste dispositivo pode fazer estes custos atingirem valores indesejados.

A energia consumida por aparelhos de ar condicionado no setor residencial mais que triplicou no intervalo entre os anos de 2006 e 2018, sendo que neste último ano 18.7 TWh (14% da energia consumida pelo setor residencial) foi destinada a este fim e a previsão é que esta grandeza atinja o valor de 48.5 TWh no ano de 2035 (FERREIRA; SOARES, 2018; LUNA, 2018).

Dimensionar incorretamente um sistema de climatização resulta no aumento acentuado do consumo, visto que equipamentos subdimensionados operarão ininterruptamente e equipamentos superdimensionados ocasionam picos excessivos de demanda. Em uma instituição de ensino superior estes custos podem ser amplificados devido à quantidade de equipamentos instalados e a constante ocupação dos ambientes internos.

Aliado a isso, de acordo com BEN 2020 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA, 2020), o consumo energético em 2019 no setor público atingiu um valor de 46,48 GWh, representando aproximadamente 8,5% de toda energia consumida no país.

Deste modo, para uma edificação de ensino é essencial o correto dimensionamento do sistema de climatização, fornecendo as condições de conforto térmico adequadas ao aprendizado do aluno e possuindo uma alta eficiência energética para evitar gastos exorbitantes com o consumo de energia.

Em um levantamento realizado no prédio 07 (Centro de Tecnologias) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) percebeu-se que a maioria dos equipamentos utilizados são splits do tipo Hi-Wall com condensadoras individuais ou do tipo janela. Alguns destes são equipamentos antigos (com eficiência energética reduzida devido ao tempo de uso) ou visivelmente inadequados para os ambientes em que estavam instalados. Além do incorreto dimensionamento em relação a potência de aquecimento e refrigeração, esse tipo de equipamento não fornece uma renovação de ar de modo a satisfazer as condições mínimas estipuladas por norma, o que prejudica a saúde e o desempenho dos ocupantes da sala.

3.2. JUSTIFICATIVA

Além dos problemas econômicos e da queda de produtividade causada pelo inadequado dimensionamento dos aparelhos de climatização, um fluxo de ar inferior ao nível normalizado pode induzir a proliferação de bactérias e vírus. Isso ocasiona doenças respiratórias e a ocorrência da “Síndrome do Edifício Doente” (LENHARO, 2014; SCHIRMER et al., 2011) o que transforma o problema econômico em um problema de saúde pública.

Pelos resultados obtidos no levantamento dos equipamentos de ar-condicionado do Centro de Tecnologia da UFSM (Anexo A), principalmente pela limitada renovação de ar dos equipamentos instalados, percebe-se a necessidade de um estudo de reprojeto para o sistema de climatização do prédio, visto que o desempenho acadêmico e até mesmo a saúde dos usuários pode ser prejudicada pelo sistema inadequado de climatização.

3.3. OBJETIVOS

a. Principais

O presente estudo visa investigar as características do sistema de climatização de uma edificação de ensino superior estudando maneiras de adequá-las de modo a priorizar a eficiência energética e satisfazer as normas de temperatura ambiente e vazão de ar externo.

b. Secundários

- Verificar as normas referentes a climatização de ambientes de ensino.
- Realizar um levantamento das características físicas, elétricas e ocupacionais das salas do prédio avaliado para possibilitar o cálculo de carga térmica.
- Calcular a carga térmica incidente sobre as áreas avaliadas por meio de software.
- Propor modificações construtivas nas salas e comparar os relutados obtidos em relação a demanda energética para climatização.
- Determinar as modificações viáveis para aumentar a eficiência energética do sistema de climatização.
- Determinar e dimensionar o sistema de climatização mais adequado.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. INTRODUÇÃO

Para o projeto de um sistema de climatização é essencial ter conhecimento sobre as normas que definem os parâmetros limites e metodologias que permitem dimensionar os equipamentos de modo a satisfazer as condições de conforto térmico sem superdimensionar os componentes da instalação.

Neste capítulo serão apresentados os parâmetros que influenciam na incidência de carga térmica em um determinado ambiente e as condições que devem ser satisfeitas para obtenção do conforto térmico.

Também será indicado o funcionamento do software utilizado para determinação de carga térmica e vazão de ar no edifício avaliado, como os dados levantados foram configurados e quais os resultados obtidos na simulação.

4.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética de uma edificação de serviço público pode ser medida de acordo com os regulamentos RTQ-C (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos), onde um dos fatores avaliados é o sistema de climatização. Esta classificação é utilizada para reduzir o consumo de recursos e, conseqüentemente, diminuir o impacto ambiental (INMETRO, 2013).

A medida que define a eficiência das máquinas destinadas por climatização é o Coeficiente de Performance (COP), representando a relação entre a potência térmica produzida e a potência elétrica do equipamento.

De acordo com o RTQ-C, quando o ambiente a ser condicionado apresentar carga térmica superior a 350 kW deve ser utilizado um sistema de condicionamento de ar central ou provar que sistemas individuais possuem um consumo de energia inferior.

Os equipamentos tipo split e tipo janela devem possuir etiquetagem classe A de acordo com a classificação do INMETRO (INMETRO, 2021). Os equipamentos não classificados pelo INMETRO devem atender os requisitos de eficiência apresentados nas Portaria n.º 299, de 19 de junho de 2013 e no RTQ-C (tanto equipamentos splits e janelas quando sistemas VRV). Os requisitos mínimos de eficiência para obtenção da classificação “A” podem ser visualizados na Tabela 1.

Alguns outros requisitos são necessários para a classificação do sistema como nível A, como por exemplo (de acordo com RTQ-C):

- Cálculo de carga térmica realizado de acordo com ASHRAE Handbook of Fundamentals e a norma NBR 16401;
- O aquecimento ou resfriamento de ar de cada zona térmica deverá ser individualmente controlado por termostatos respondendo à temperatura do ar da referida zona;
- Sistema com desligamento automático quando a sala não estiver ocupada, possibilidade de programação funcional de horário de operação ou acionamento manual por timer pré-definido;
- Determinação de zonas térmicas com funcionamento independente (alimentadas por equipamentos que satisfazem os requisitos da Tabela 1, com área máxima de 2300m²).

Tabela 1: Eficiência Mínima para equipamentos de climatização

Tipo de equipamento	Capacidade	Tipo de aquecimento	Subcategoria ou condição de classificação	Eficiência mínima
Condicionadores de ar VRV com condensação de ar	<19 kW	Todos	Multi-split VRV	3,81 SCOP
	> 19 kW e < 40kW	Ausente ou resistência elétrica	Multi-split VRV	3,22 COP
		Ausente ou resistência elétrica	Multi-split VRV com aquecimento e refrigeração simultâneos	3,16 COP
	> 40kW e < 70kW	Ausente ou resistência elétrica	Multi-split VRV	3,11 COP
		Ausente ou resistência elétrica	Multi-split VRV com aquecimento e refrigeração simultâneos	3,05 COP
	> 70kW	Ausente ou resistência elétrica	Multi-split VRV	2,78 COP
		Ausente ou resistência elétrica	Multi-split VRV com aquecimento e refrigeração simultâneos	2,73 COP
	Condicionadores de ar resfriados a ar	> 19 kW e < 40kW	Resistência elétrica	Split e unitário
Outros			Split e unitário	3,22 COP
> 40kW e < 70kW		Resistência elétrica	Split e unitário	3,22 COP
		Outros	Split e unitário	3,16 COP
> 70kW e < 223 kW		Resistência elétrica	Split e unitário	2,93 COP
		Outros	Split e unitário	2,87 COP
> 223 kW		Resistência elétrica	Split e unitário	2,84 COP
		Outros	Split e unitário	2,78 COP

Fonte: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), Portaria n.º 372, de 17 de setembro de 2010.

Existem diversos estudos que apresentam a comparação entre sistemas de climatização utilizando sistemas splits e com um sistema VRV central, tais estudos apontam que o uso de um sistema de fluxo de ar refrigerante variável pode ocasionar uma redução de até 30% do consumo de energia no verão e quase 60% no inverno (GOETZLER, WILLIAM. ROTH, KURT W. BRODRICK, 2004; LIU; HONG, 2010; ZHOU et al., 2007)

Esta maior eficiência se deve a fatores como: os compressores do sistema podem operar com velocidade abaixo da rotação máxima, operando normalmente entre 30% e 70% de sua capacidade máxima e sempre buscando a operação na capacidade ideal; uma

evaporadora (ou conjunto de evaporadoras) pode ser desativada quando não há necessidade de climatização no ambiente onde ela está inserida e; é possível realizar a “recuperação de calor” em edificações que demandem aquecimento e refrigeração simultaneamente (GOETZLER, WILLIAM. ROTH, KURT W. BRODRICK, 2004).

4.3. REVISÃO NORMATIVA

Neste projeto será utilizada a norma brasileira NBR 16401, que determina os valores adequados para a correta climatização de ambientes, projetos de instalações de ar condicionado, parâmetros de conforto térmico, e qualidade de ar interior, esta norma será complementada pelas normas internacionais (ASHRAE, 2017) e eventualmente citando a norma antecedente à anteriormente mencionada e já expirada (NBRISO6401, 1980) em situações que as normas atuais não abrangem. Também serão utilizados como referência dados apresentado no livro Instalações de Ar Condicionado de Hélio Creder.

De acordo com a lei Nº 13.589, de 4 de janeiro 2018, os parâmetros, normas e procedimentos necessários à garantia da boa qualidade do ar interior citados na Resolução 9 (ANVISA) devem ser atendidos.

Para o cálculo da condutividade térmica de estruturas será utilizado os valores adotados na NBR 15220 (NBR15220, 2005).

4.3.1. CARGA TÉRMICA

A primeira etapa para o projeto de um sistema de climatização é o cálculo da carga térmica de um determinado ambiente. Esta grandeza de base define a potência de refrigeração a ser suprida pelos equipamentos. De acordo com (NBR16401-1, 2008) no item 6.1.3.2, o cálculo da carga térmica (exceto para sistemas muito simples) deve ser realizado por meio de software que utilize os métodos da ASHRAE TFM ou, preferencialmente, RTS. O cálculo consiste na soma do calor produzido por diferentes fontes, sendo estas a própria temperatura ambiental local, a incidência solar direta, a infiltração de ar externo, o calor gerado pelos ocupantes da sala, o aquecimento de equipamentos eletrônicos e a iluminação.

É essencial para a modelagem do ambiente o conhecimento, ao menos, as características de temperatura e incidência solar de região avaliada, pois estes termos possuem uma grande influência na transmissão de calor para um ambiente. Tais dados podem ser obtidos através do banco de dados do Instituto Nacional de pesquisas Espaciais (INPE). Tais dados, também podem ser fornecidos através de um arquivo de dados (no formato .epw, por exemplo) contendo um histórico destes parâmetros em determinado intervalo de tempo. Tais informações podem ser aplicadas diretamente em softwares especializados para a análise da gestão energética e dimensionamento da carga térmica de uma dada edificação.

Deve-se também ter conhecimento da coloração externa da edificação e dos materiais utilizados em paredes e telhados bem como espessura e opacidade dos vidros de janelas. Deste modo pode-se determinar a carga térmica incidente por condução e por incidência solar.

O calor transmitido pelo fluxo não controlado de ar externo para o ambiente é determinado pela vazão de ar por janelas, portas e frestas. Em (NBRISO6401, 1980) são apresentadas tabelas que estimam a vazão de ar externo por fresta, sendo que alguns valores estão apresentados na Tabela 2

Tabela 2: Fluxo de ar externo de acordo com o tipo de abertura

Tipo de abertura	Fluxo de ar por metro de fresta
Janela comum	3,0 (m ³ /h)
Janela basculante	3,0 (m ³ /h)
Porta com vedação	1,8 (m ³ /h)
Porta mal ajustada	13,0 (m ³ /h)
Porta bem ajustada	6,5 (m ³ /h)

Fonte: Elaborado pelo Autor

Referente a carga interna originada do metabolismo dos ocupantes, é importante o conhecer a atividade exercida na sala avaliada. Em (NBR16401-1, 2008) e (ASHRAE, 2017) são apresentadas tabelas que determinam o calor gerado de acordo com a atividade dos ocupantes. Alguns destes dados estão dispostos na Tabela 3, onde pode-se comparar o

valor de calor gerado pelo metabolismo adotado em uma das normas com o tabelado em uma atividade similar apresentada na outra.

Para a carga provinda de iluminação e outros equipamentos elétricos, é possível obter a potência calorífica emitida para o ambiente nas tabelas C.2, C.3, C.4 e C.5 da (NBR 16401-1, 2008) ou na norma referente a iluminação de ambientes internos (NBRISO/CIE 8995, 2013). Alguns destes dados podem ser visualizados nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 3: Calor típico gerado pelo metabolismo de acordo com a atividade exercida de (AHRAE Fundamentals) e a atividade semelhante apresentada na NBR 16401

Atividade	Calor gerado ASHRAE 2017 (W)	Atividade	Calor gerado NBR 16401-1 (W)
Dormindo	72	--	--
Sentado (relaxado)	99	Trabalho leve (escritório)	115
Sentado (lendo)	108	Trabalho moderado (escritório)	140
Sentado (digitando)	117	--	--
Em pé (relaxado)	126	Em pé (relaxado)	160
Caminhando (3.2 km/h)	207	Caminhando	160
Caminhando (4.3 km/h)	270	Caminhando (4.8 km/h)	295
Limpendo a casa	207 a 360	--	--
Cozinhando	171 a 207	--	--
Operando máquinas pesadas	423	Operando máquinas pesadas	470
Dançando	252 a 459	Dançando moderadamente	265

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4: Taxa típica de dissipação de calor por iluminação de acordo com a finalidade do ambiente

Ambiente	Iluminação (Lux)	Potência dissipada (W/m ²)
Escritórios	500	16
Bibliotecas	500	16
Salas de aula	500	16
Áreas de circulação	100	8
Restaurantes	150	9

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 5: Taxa típica de dissipação de calor em equipamentos de escritório

Equipamento	Uso contínuo (W)	Modo economia (W)
Impressora (mesa)	215	35
Copiadora (mesa)	400	20
Computador	55	20
Monitor 15 in	55	0
Monitor 20 In	80	0

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 6: Densidade de carga típica para escritórios de acordo com a concentração de postos de trabalho, considerando um computador e um monitor por posto de trabalho mais uma *impressora* e fax.

Tipo de escritório	Densidade de carga (W/m ²)
15.5 m ² por posto de trabalho	5.4
11.5 m ² por posto de trabalho	10.7
9.3 m ² por posto de trabalho	16.2
7.5 m ² por posto de trabalho	21.5

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3.2. RENOVAÇÃO DE AR

Outro fator que a ser considerado ao conforto térmico é o fluxo de ar externo. Diversos poluentes e materiais químicos e biológicos nocivos podem estar presentes no ar de um

determinado ambiente (como descrito no anexo B da (NBR16401-2, 2008) e nos capítulos 11 e 12 do ASHRAE Fundamentals (ASHRAE, 2017)), também o CO₂, além de prejudicial a saúde, pode ocasionar a síndrome do edifício doente (mais detalhes no anexo C da (NBR16401-2, 2008)), desse modo, é importante que o ambiente avaliado tenha uma renovação de ar adequada. O item 5.2.1 da NBR 16401-3 apresenta uma relação entre a ocupação e a área de uma sala e a vazão de ar eficaz, isto é, o fluxo de ar externo ideal. Esta relação pode ser visualizada na Tabela 7, onde é apresentado um fator de vazão de ar por pessoa (F_p, dado em L/s*pessoa) e um fator de vazão de ar por área (F_a, dado em L/s*m²) para cada nível de vazão. O Nível 1 representa os valores mínimos de ar exterior para ventilação estipulados por norma, o Nível 3 representa a condição de ventilação onde é percebido uma redução nas reclamações e manifestações alérgicas dos ocupantes do ambiente e o Nível 2 representa valores intermediários entre o Nível 1 e o Nível 3.

Tabela 7: Vazão de ar eficaz de acordo com o tipo de ambiente e o nível de vazão desejado

Local	Densidade de ocupação (pessoas/100 m ²)	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
		F _p	F _a	F _p	F _a	F _p	F _a
Escritório com baixa densidade	11	2.5	0.3	3.1	0.4	3.8	0.5
Biblioteca	10	2.5	0.6	3.5	0.8	3.8	0.9
Hall de edifícios	10	2.5	0.3	3.1	0.4	3.8	0.5
Sala de reunião	50	2.5	0.3	3.1	0.4	3.8	0.5
Sala de aula	35	5.0	0.6	6.3	0.8	7.5	0.9
Laboratório de informática	25	5.0	0.6	6.3	0.8	7.5	0.9
Teatro/Auditório (plateia)	150	2.5	0.3	3.5	0.4	3.8	0.5

Fonte: Elaborado pelo Autor

Contudo, a NR 9 recomenda uma Taxa de Renovação de Ar mínima de 27 m³/pessoa/hora (7.5 L/pessoa/segundo), de modo o valor utilizado neste trabalho será o maior valor entre o calculo apresentado anteriormente e o recomendado pela NR 9.

É importante mencionar também a necessidade de uso de filtros de partículas para purificação do ar exterior a ser inserido no ambiente. Em (NBR16401-2, 2008), as tabelas 4 e 5 apresentam qual filtro deve ser usado, de acordo com o tipo de ambiente, e sua eficiência gravimétrica média, como indicado na Tabela 8 e Tabela 9.

Sistemas de climatização de vazão de ar variável (VRV) utilizam naturalmente estes filtros em seu sistema de insuflamento de ar, porém equipamentos convencionais (splits do tipo hi-wall com evaporadoras individuais) não possuem vazão de ar externo, nesta situação os filtros devem ser utilizados no sistema independente de insuflamento de ar.

Tabela 8: Eficiência e classificação de filtros de partículas

Tipo de filtro	Classe	Eficiência gravimétrica média (E_g %)	Eficiência média para partículas de 0.4 μm (E_f %)
Grosso	G 1	$50 < E_g < 65$	-----
	G 2	$65 < E_g < 80$	-----
	G 3	$80 < E_g < 90$	-----
	G 4	$90 < E_g$	-----
Fino	F 5	-----	$40 < E_f < 60$
	F 6	-----	$60 < E_f < 80$
	F 7	-----	$80 < E_f < 90$
	F 8	-----	$90 < E_f < 95$
	F 9	-----	$95 < E_f$

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 9: Classe de filtro a ser utilizada de acordo com a utilização do ambiente

Aplicação Típica	Classe
Supermercado, agência bancária, lojas comerciais e de serviços	G4
Escritório, sala de reunião, sala de digitação	F6
Biblioteca, museu – Áreas públicas	F5
Biblioteca, museu – Exposição de obras sensíveis	G3 + F8
Teatro, cinemas, auditório, sala de aula	F5
Lanchonete, cafeteria	G4
Restaurante, bar, danceteria, salão de festas	F5
Residências	G3

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.4. CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico pode ser medido em uma escala numérica da própria ASHRAE (ASHRAE, 2017) que varia de +3 até -3, onde +3 representa uma sensação de muito calor, 0 uma sensação neutra e -3 uma sensação de frio extremo, o conforto térmico ocorre entre os valores de -0.5 e +0.5,. Em (NBR16401-3, 2008) são estipulados os parâmetros que resultam em sensações adequadas de conforto térmico para 80% das pessoas, considerando trabalho sedentário e um grupo homogêneo de pessoas no ambiente de acordo com o vestuário típica de cada estação, como apresentado na Tabela 10, a influência do vestuário representa um resistência térmica á troca de calor do corpo com o ambiente, expressa em *clo* (onde 1 clo = 0,155 m²K/W). Além disso, a diferença de temperatura em 0.10 m e 1.10 m do solo (tornozelo e pescoço de uma pessoa sentada) deve ser inferior a 3 K.

Tabela 10: Faixa de temperatura onde o conforto térmico é atingido

Estação	Vestuário	Faixa de temperatura para conforto térmico	Umidade relativa do ar
Verão	0.5 clo	22.5 °C a 25.5 °C 23.0 °C a 26.0 °C	65% 35%
Inverno	0.9 clo	21.0 °C a 23.5 °C 21.5 °C a 24.0 °C	60% 30%

Fonte: Elaborado pelo Autor

A NR 9 recomenda a faixa de temperatura de buldo seco de 23°C a 26°C para o verão e de 20°C a 22°C para o inverno.

4.5. GRANDEZAS FUNDAMENTAIS

A potência dos equipamentos do sistema de climatização, quando corretamente dimensionados, é proporcional ao somatório das cargas térmicas acumuladas no interior da sala avaliada. Deste modo, reduzindo a carga de tais salas resulta em uma redução da potência de refrigeração necessária, diminuindo assim os custos energéticos do processo.

Avaliando o método manual de calculo de carga térmica de Helio Creder (CREDER, 2004), percebe-se as diferentes formas que a carga térmica incide sobre um determinado ambiente, esta incidência pode ocorrer por condução (devido à diferença de temperatura

entre o ambiente externo e interno da edificação), insolação (exposição direta ao sol), fluxo de ar externo e calor gerado internamente pela atividade exercida por seus ocupantes, número de ocupantes, uso de equipamentos eletrônicos e pela iluminação das salas. Considerando que a atividade exercida pelas pessoas do ambiente, o uso de equipamentos eletrônicos e a potência de iluminação da sala não podem (ou não é conveniente) ser limitados, apenas é possível reduzir o calor transmitido por condução e insolação.

O calor transmitido por condução depende de três fatores: a temperatura do ambiente externo, a temperatura interna da edificação a ser avaliada e a resistência térmica entre estes dois ambientes, essa resistência depende de características físicas dos materiais utilizados nas paredes e divisórias. O fluxo de calor entre dois ambientes separados por algum material pode ser visualizado na equação abaixo, onde T_1 e T_2 representam as temperaturas da face externa e interna, respectivamente, q representa a taxa de condução de calor em determinado instante de tempo (W ou kcal/h), A sendo a área da superfície do material, L o comprimento ou espessura e K a sua condutividade térmica ((CREDER, 2004)).

$$q = \frac{A \cdot K}{L} \cdot (T_1 - T_2) \quad (1)$$

A parcela $\frac{A \cdot K}{L}$ da equação é o inverso da resistência térmica de um material, ou seja:

$$R_t = \frac{L}{A \cdot K}$$

De modo que:

$$q = \frac{1}{R_t} \cdot (T_1 - T_2)$$

Em caso de divisórias compostas de diferentes materiais (como normalmente ocorre na prática), a resistência térmica de cada um dos elementos é somada e a taxa de condução de calor é representada conforme equação abaixo.

$$q = (T_1 - T_2) \cdot \sum \left(\frac{1}{R_t} \right) \quad (2)$$

O valor da condutividade térmica de alguns materiais comumente utilizados em edificações pode ser visualizado na Tabela 11. Os dados apresentados utilizam como referência os dados apresentados no anexo B.2 da (NBR15220, 2005).

Tabela 11: Propriedades térmicas de materiais usualmente utilizado em construções de acordo com NBR 15220

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade (W/(m.K))	Calor específico (kJ/(kg.k))
Argamassa comum	1800 – 2100	1,15	1,00
Argamassa de gesso	1200	0,70	0,84
Tijolo de barro	1000 – 1300 1300 – 1600 1600 – 1800 1800 – 2000	0,70 0,90 1,00 1,05	0,92
Concreto normal	2200 – 2400	1,75	1,00
Concreto leve (cavernoso)	1700 – 2100	1,40	1,00
Lã de rocha	20 – 200	0,045	0,75
Lã de vidro	10 – 100	0,045	0,70
Manta de fibra cerâmica	100 - 150	0,050	0,84
Poliestireno expandido	30 - 50	0,040	1,50
Poliestireno extrudado	20 - 30	0,029	1,50
Madeira de alta densidade	800 – 1000	0,29	1,34
Aglomerado de partículas de madeira	550 – 650 650 – 750	0,14 0,17	2,30
Placas de madeiras prensadas	350 – 450 350 – 450	0,10 0,12	2,30
Compensado de madeira	350 – 450 350 – 450	0,12 0,15	2,30
Vidro comum	2500	1,00	0,84

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para reduzir a parcela de calor ocorrida por condução podem-se adicionar materiais isolantes nas paredes e no forro, como lã mineral ou fibra de vidro ou utilizar acabamentos com propriedades mais isolantes

Por exemplo, considerando uma parede de tijolo de 24 cm de espessura, com acabamento de argamassa comum de 1,5 cm em cada extremidade, teremos uma resistência térmica de:

$$R_t = \frac{L_{\text{tijolo}}}{A \cdot K_{\text{tijolo}}} + \frac{2 \cdot L_{\text{argamassa}}}{A \cdot K_{\text{argamassa}}} = \frac{0,24}{A \cdot 1,0} + \frac{2 \cdot 0,015}{A \cdot 1,15} = \frac{0,266}{A} = 0,266 \frac{K}{W \cdot m^2}$$

Destaca-se que, como a área do tijolo é a mesma área da argamassa, é possível definir a resistência térmica em razão da área total da superfície.

Para a mesma situação acima, porém adicionando uma camada de 75 mm de lã de rocha, a resistência térmica será:

$$R_t = \frac{L_{\text{tijolo}}}{A \cdot K_{\text{tijolo}}} + \frac{2 \cdot L_{\text{argamassa}}}{A \cdot K_{\text{argamassa}}} + \frac{L_{\text{isolante}}}{A \cdot K_{\text{isolante}}} = \frac{0,266}{A} + \frac{0,075}{0,045 \cdot A} = 1,67 \frac{K}{W \cdot m^2}$$

Neste exemplo, o uso de um isolante (lã de rocha) reduziu transferência de calor em mais de 6 vezes.

O calor resultante de exposição ao sol pode ser reduzido por utilização de vidros opacos, uso de pintura externa de paredes de cores claras (com alto coeficiente de reflexão e baixo coeficiente de absorvidade) ou pelo uso de brises, reduzindo a incidência direta do sol.

4.6. RECURSOS COMPUTACIONAIS

O software que será utilizado neste projeto será o EnergyPlus, que será utilizado em conjunto com o programa de fonte aberta OpenStudio e com o software de modelagem 3D SketchUp.

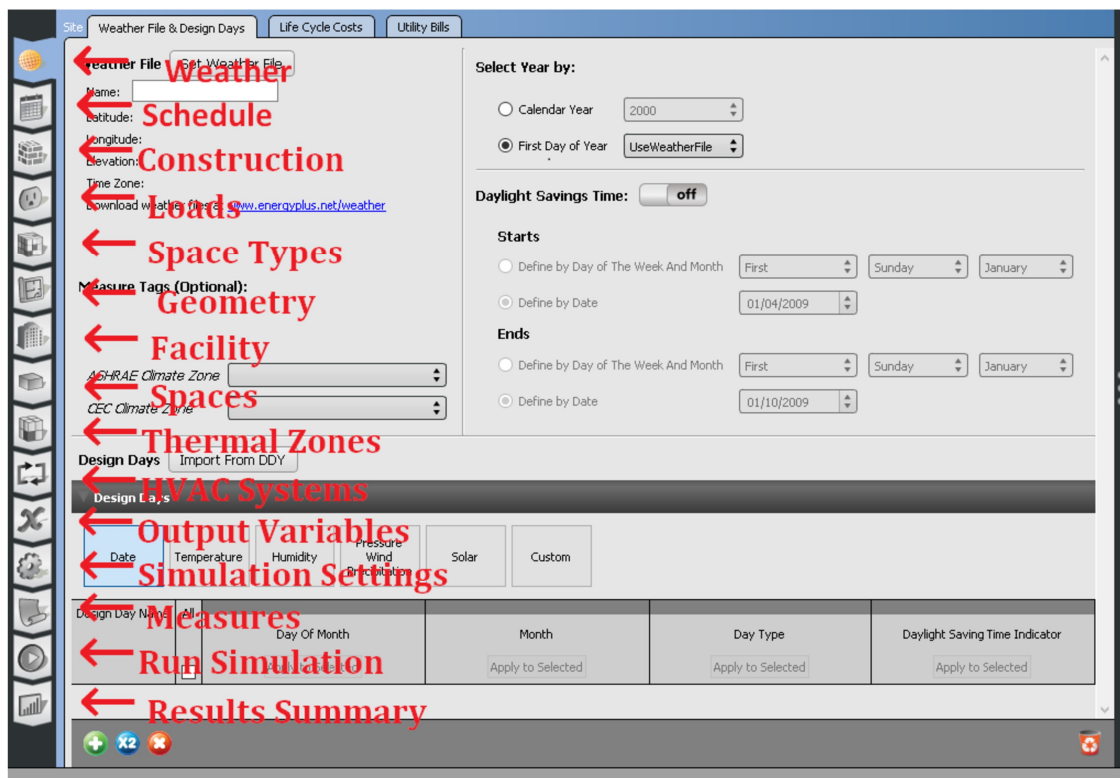
4.6.1. OPENSTUDIO

O OpenStudio é uma ferramenta de suporte para modelagens energéticas do EnergyPlus, possuindo uma interface mais amigável e intuitiva quando comparada ao EnergyPlus.

No OpenStudio, são inseridos os dados de entradas (Inputs) referentes as características físicas e ocupacionais do ambiente, bem como dados geográficos da região. A organização do aplicativo segue uma ordem hierárquica, onde abas de temas abrangentes são separadas em sub-abas, que também seguem uma ordem hierárquica.

As abas principais podem ser visualizadas na Figura 1:

Figura 1: Layout Openstudio



Fonte: Autor

4.6.1.1. WEATHER

Nesta aba são configuradas as características referentes a localização geográfica e histórico climatológico do local da edificação avaliada.

Os dados climáticos (.epw) utilizados neste trabalho se referem a região de Santa Maria e foram importados do banco de dados do INPE.

Também é possível nesta aba inserir dados sobre valor da energia elétrica e ciclo de vida de equipamentos para uma análise econômica mais completa.

Na Figura 2 o layout desta aba é apresentado.

Figura 2: Aba Weather – Openstudio

Weather File

Name: Santa Maria AB
 Latitude: -29.711
 Longitude: -53.688
 Elevation: 96.5
 Time Zone: -3
 Download weather files at www.energypus.net/weather

Measure Tags (Optional):

ASHRAE Climate Zone:
 CEC Climate Zone:

Design Days

Design Days

Design Day Name	All	Day Of Month	Month	Day Type	Daylight Saving Time Indicator
	<input type="checkbox"/>	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected	Apply to Selected
B Ann Clg .4% Conds DB=>MWB	<input type="checkbox"/>	21	1	SummerDesignDay	<input type="checkbox"/>
B Ann Clg .4% Conds DP=>MDB	<input type="checkbox"/>	21	1	SummerDesignDay	<input type="checkbox"/>
Ann Clg .4% Conds Enth=>MDB	<input type="checkbox"/>	21	1	SummerDesignDay	<input type="checkbox"/>

Fonte: Autor

4.6.1.2. SCHEDULES

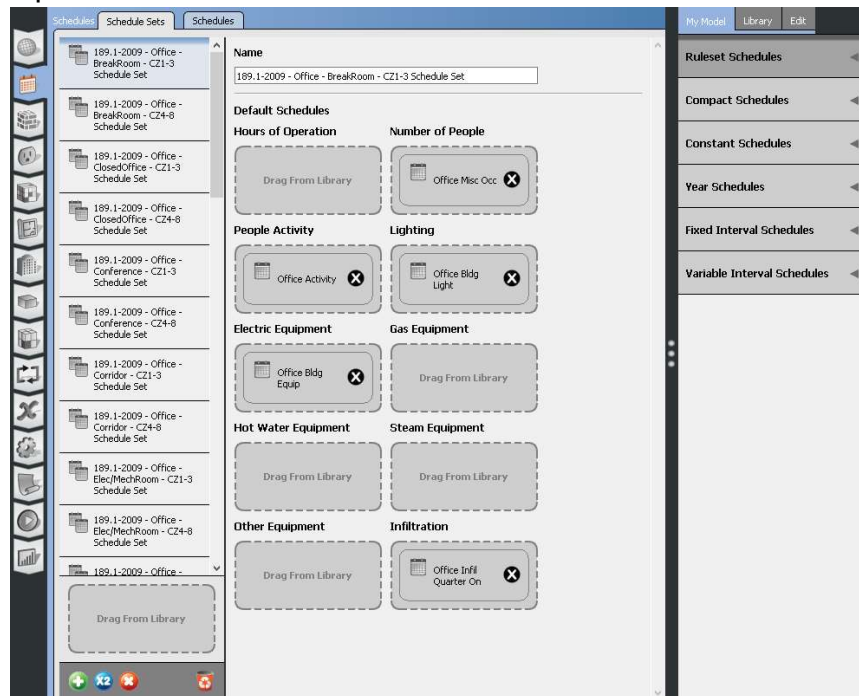
Nesta etapa, são definidos os cronogramas de ocupação das salas da edificação, referente a atividade exercida pelas pessoas, iluminação e uso de equipamentos elétricos. Também aqui se define a temperatura do termostato.

Os cronogramas são definidos de forma gráfica, a partir da construção de uma ou mais curvas diárias, que representam o comportamento da variável em diferentes dias de semana ou meses do ano.

Os gráficos podem possuir escala unitária (0 á 1), ou serem referentes a alguma variável definida, como potência (para nível de atividade), temperatura (para termostatos), velocidade ou pressão (para especificação de equipamentos), dentre outros.

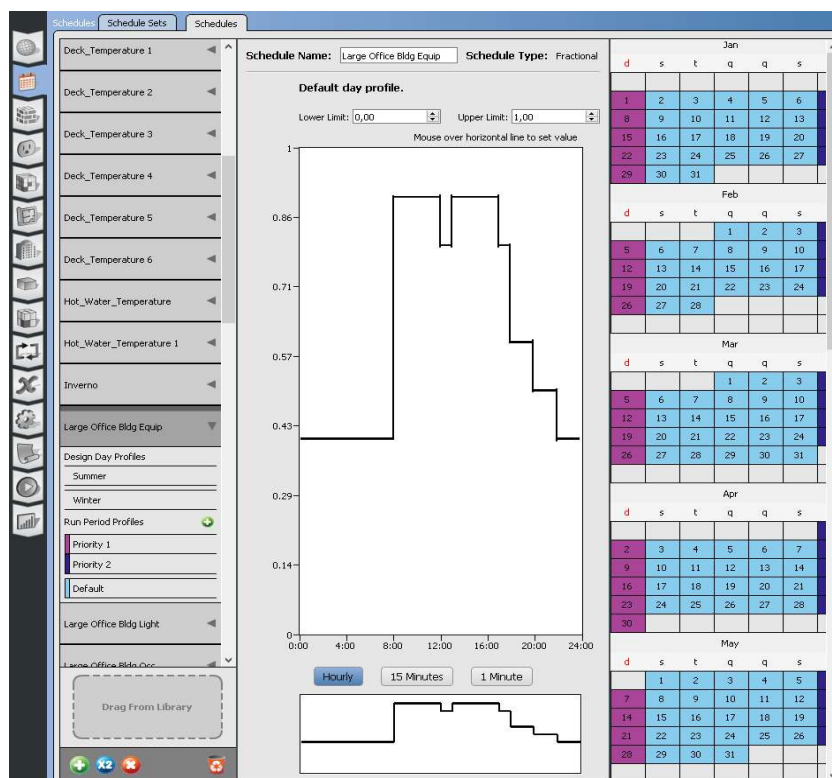
Na sub-aba Schedules são definidas estas curvas (Figura 25), enquanto na sub-aba Schedules Sets estas curvas são associadas ao tipo carga ou informação que elas representam (Figura 3).

Figura 3: Aba Schedules - sub-aba Schedules Sets – Openstudio



Fonte: Autor

Figura 4: Aba Schedules - sub-aba Schedules – Openstudio



Fonte: Autor

4.6.1.3. CONSTRUCTIONS

Nesta etapa, são definidas a constituição de paredes, divisórias, piso, teto e janelas a serem utilizadas na estrutura.

Existem 3 sub-abas neste item, Materials, Constructions e Constructions Sets. Na primeira são definidas as características físicas dos diferentes materiais a serem utilizados (tijolos, argamassa, vidros, etc.), como apresentado na Figura 5. Em Constructions os materiais criados são combinados para formar as estruturas física da construção, como paredes e janelas (Figura 6). Por fim, o conjunto de construções a serem utilizados no projeto, e conseqüentemente nos cálculos das simulações, são definidos na aba Constructions Sets (Figura 7).

Figura 5: Aba Constructions - sub-aba Materials – Openstudio

Roughness:	Thickness:
<input type="text" value="Rough"/>	<input type="text" value="0.189000"/> m
Conductivity:	Density:
<input type="text" value="2.381000"/> W/m·K	<input type="text" value="1100.000000"/> kg/m ³
Specific Heat:	Thermal Absorptance:
<input type="text" value="920.000000"/> J/kg·K	<input type="text" value="0.900000"/>
Solar Absorptance:	Visible Absorptance:
<input type="text" value="0.400000"/>	<input type="text" value="0.400000"/>

Fonte: Autor

Figura 6: Aba Constructions - sub-aba Constructions – Openstudio

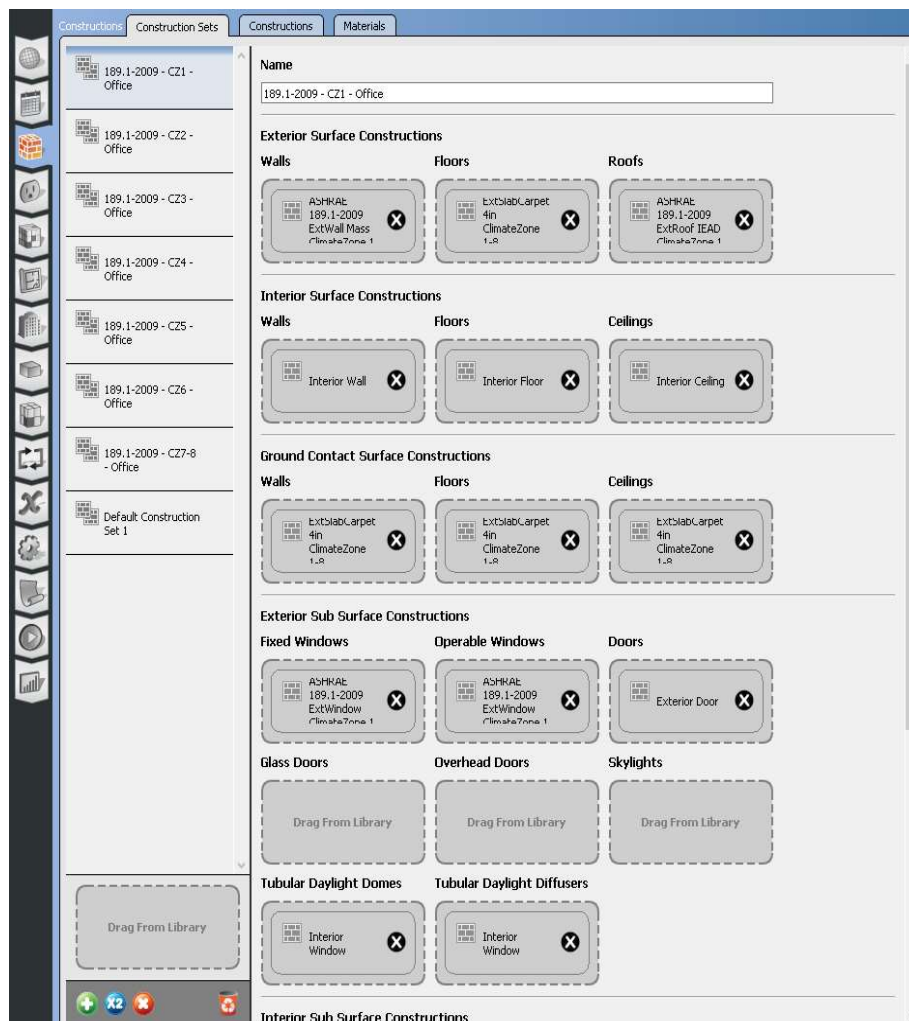
Layer:

Outside

- 1IN Stucco
- 8IN Concrete HW
- Wall Insulation [40]
- Brick 20 cm
-

Fonte: Autor

Figura 7: Aba Constructions - sub-aba Constructions Sets – Openstudio



Fonte: Autor

4.6.1.4. LOADS

A aba Loads é destinada a definir diferentes cargas existentes nas salas da estrutura a ser modelada. Estas cargas podem se referir ao número máximo de ocupantes, potência máxima de iluminação ou potência máxima de equipamentos elétricos existentes de cada sala.

Os dados podem ser informados tanto em valores absolutos como em função da área da sala ou número de ocupantes (para o caso de potência de iluminação ou equipamentos elétricos).

Figura 8: Aba Loads - Ocupação das salas (número de pessoas) - Openstudio

Name:		
<input type="text" value="189.1-2009 - Office - BreakRoom - CZ4-8 People Definition"/>		
Number of People:	People per Space Floor Area:	Space Floor Area per Person:
<input type="text"/>	<input type="text" value="0.538196"/> people/m ²	<input type="text"/> m ² /person
Fraction Radiant:	Sensible Heat Fraction:	Carbon Dioxide Generation Rate:
<input type="text" value="0.300000"/>	<input type="text" value="autocalculate"/>	<input type="text" value="0.000038"/> L/s·W

Fonte: Autor

Figura 9: Aba Loads - Carga de iluminação (potência elétrica destinada a iluminação) - Openstudio

Name:		
<input type="text" value="189.1-2009 - Office - BreakRoom - CZ1-3 Lights Definition"/>		
Lighting Power:	Watts Per Space Floor Area:	Watts Per Person:
<input type="text"/> W	<input type="text" value="11.625023"/> W/m ²	<input type="text"/> W/person
Fraction Radiant:	Fraction Visible:	
<input type="text" value="0.000000"/>	<input type="text" value="0.000000"/>	
Return Air Fraction:		
<input type="text" value="0.000000"/>		

Fonte: Autor

4.6.1.5. SPACE TYPES

Em Space Types, são associadas os conjuntos de construções (Construction Set), cargas (Load) e cronogramas (Schedule Set) criados anteriormente a determinadas salas de mesmas características.

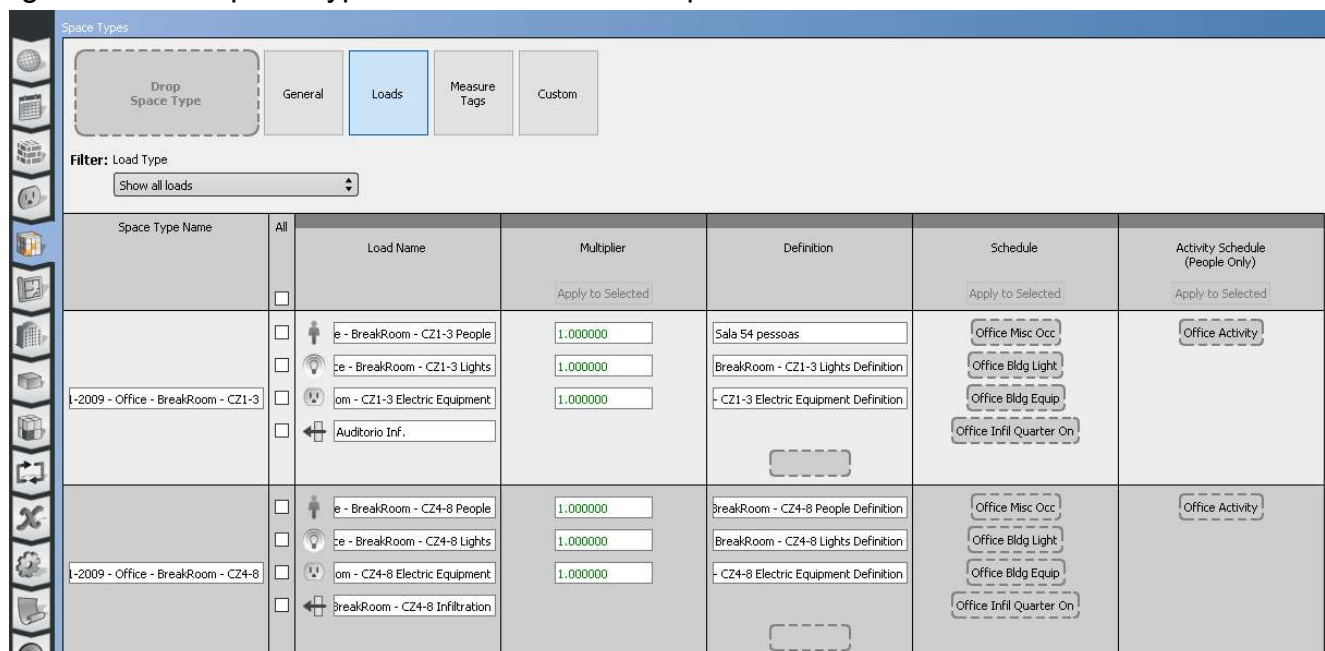
Ao combinar a carga de número de ocupantes em uma sala com o cronograma de ocupação, por exemplo, obtêm-se o número de pessoas na sala em cada instante de tempo. Combinando isto com o tipo de atividade exercida pelos ocupantes da sala define-se a carga térmica gerada por esta fonte.

Figura 10: Aba Space Types - sub-aba General - Openstudio

Space Type Name	All	Rendering Color	Default Construction Set	Default Schedule Set	Design Specification Outdoor Air	Space Infiltration Design Flow Rates	Space Infiltration Effective Leakage Areas
- Office - BreakRoom - CZ1-3	<input type="checkbox"/>	■	<input type="button" value="Apply to Selected"/>	189.1-2009 - Office - BreakR	<input type="button" value="Apply to Selected"/>	Auditorio Inf.	<input type="button" value="Apply to Selected"/>
- Office - BreakRoom - CZ4-8	<input type="checkbox"/>	■	<input type="button" value="Apply to Selected"/>	189.1-2009 - Office - BreakR	Vazão de ar - Escritórios	BreakRoom - CZ4-8 Infiltration	<input type="button" value="Apply to Selected"/>
Office - ClosedOffice - CZ1-3	<input type="checkbox"/>	■	<input type="button" value="Apply to Selected"/>	189.1-2009 - Office - Closed	189.1-2009 - Office - Closed	ClosedOffice - CZ1-3 Infiltration	<input type="button" value="Apply to Selected"/>

Fonte: Autor

Figura 11: Aba Space Types - sub-aba Loads - Openstudio



Fonte: Autor

4.6.1.6. GEOMETRY

Esta aba é destinada a modelagem física do ambiente. Neste trabalho a modelagem foi realizada no software Sketchup, e será apresentada adiante neste documento.

4.6.1.7. FACILITY

Este item é utilizado para complemento da modelagem do ambiente, possuindo características de equipamentos externos, sombreamento, altura do pé-direito, etc.

Novamente, a modelagem do edifício foi realizada em um diferente software, tornando desnecessária a descrição desta aba.

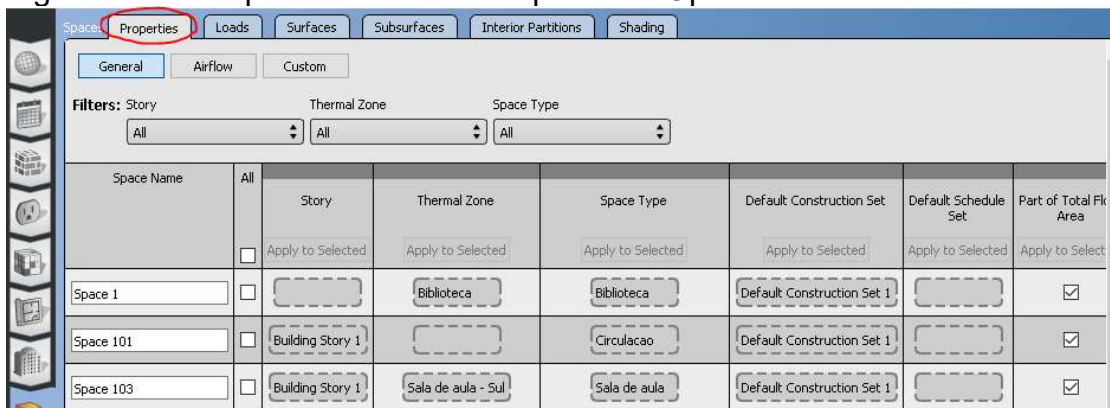
4.6.1.8. SPACES

Em Spaces é possível visualizar o resumo das características de cada sala. Na aba principal deste item, Figura 12 visualiza-se a zona térmica a qual a sala é

contida, o tipo de espaço (Space Type) e o conjunto de construções (Construction Set) das salas.

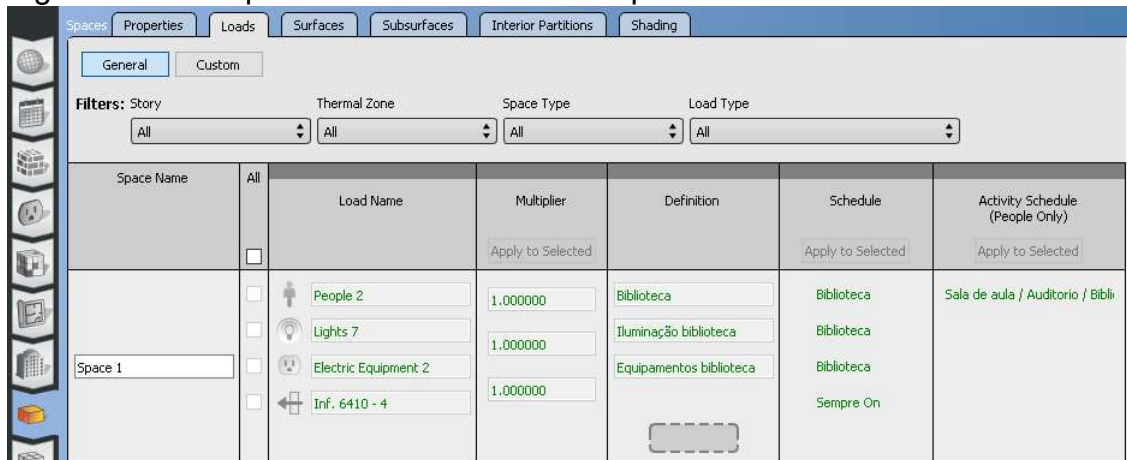
Nas demais sub-abas, podem ser verificadas as informações de cargas (Figura 13), superfícies (Figura 14), subsuperfícies, partições e sombreamento de cada um dos ambientes.

Figura 12: Aba Spaces - sub-aba Properties – Openstudio



Fonte: Autor

Figura 13: Aba Spaces - sub-aba Loads – Openstudio



Fonte: Autor

Figura 14: Aba Spaces - sub-aba Surfaces - Openstudio

Space Name	Surface Name	Surface Type	Construction	Outside Boundary Condition	Outside Boundary Condition Object	Sun Exposure	Wind Exposure
Space 1	Surface 115	Wall	Paredes	Outdoors		SunExposed	WindExposed
	Surface 119	Wall	Paredes	Outdoors		SunExposed	WindExposed
	Surface 123	Wall	Paredes	Outdoors		SunExposed	WindExposed
	Surface 385	RoofCeiling	Telhado externo	Outdoors		SunExposed	WindExposed
	Surface 122	Wall	Paredes	Outdoors		SunExposed	WindExposed
	Surface 131	Floor	Interior Floor	Ground		NoSun	NoWind
	Surface 386	RoofCeiling	Telhado externo	Outdoors		SunExposed	WindExposed
	Surface 509	RoofCeiling	Interior Ceiling	Surface	Surface 536	NoSun	NoWind

Fonte: Autor

4.6.1.9. THERMAL ZONES

Nesta aba são visualizadas as zonas térmicas e suas características, como seus respectivos termostatos de inverno e verão (criados como cronograma de temperatura na aba Schedules).

Figura 15: Aba Thermal Zones – Openstudio

Name	All	Rendering Color	Turn On Ideal Air Loads	Air Loop Name	Zone Equipment	Cooling Thermostat Schedule	Heating Thermostat Schedule	Humidifying Setpoint Schedule
Administração	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>	with PFP Boxes and Reheat	Duct Parallel PIU Reheat 1	Termostato verão	Termostato inverno	
Auditório	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>	with PFP Boxes and Reheat	Duct Parallel PIU Reheat 2	Termostato verão	Termostato inverno	
Biblioteca	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>	with PFP Boxes and Reheat	Duct Parallel PIU Reheat 3	Termostato verão	Termostato inverno	
Sala de aula - Norte	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>	with PFP Boxes and Reheat	Duct Parallel PIU Reheat 4	Termostato verão	Termostato inverno	
Sala de aula - Sul	<input type="checkbox"/>	■	<input type="checkbox"/>	with PFP Boxes and Reheat	Duct Parallel PIU Reheat 5	Termostato verão	Termostato inverno	

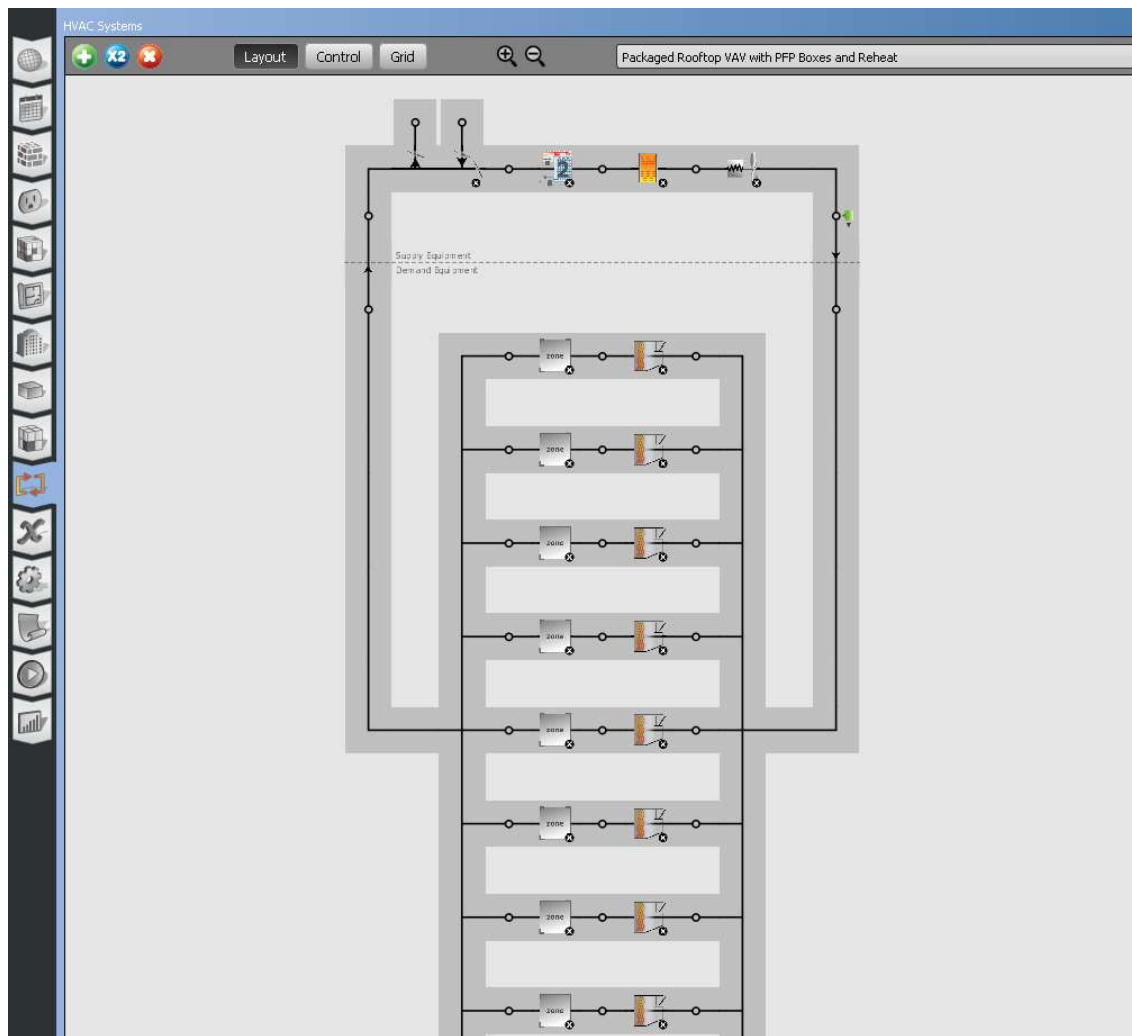
Fonte: Autor

4.6.1.10. HVAC SYSTEMS

No item HVAC Systems (Sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado) são definidos os tipos de equipamentos do sistema HVAC a ser simulado. Estes equipamentos podem ser posicionados de acordo com o fluxograma desejado, podendo alimentar diversas zonas térmicas como apresentado na Figura 16.

Neste projeto, o controle de temperatura (aquecimento e arrefecimento) bem como a ventilação são alimentados eletricamente, de modo que os equipamentos a serem adicionados no projeto possuem esta mesma característica.

Figura 16: Aba HVAC Systems – Openstudio



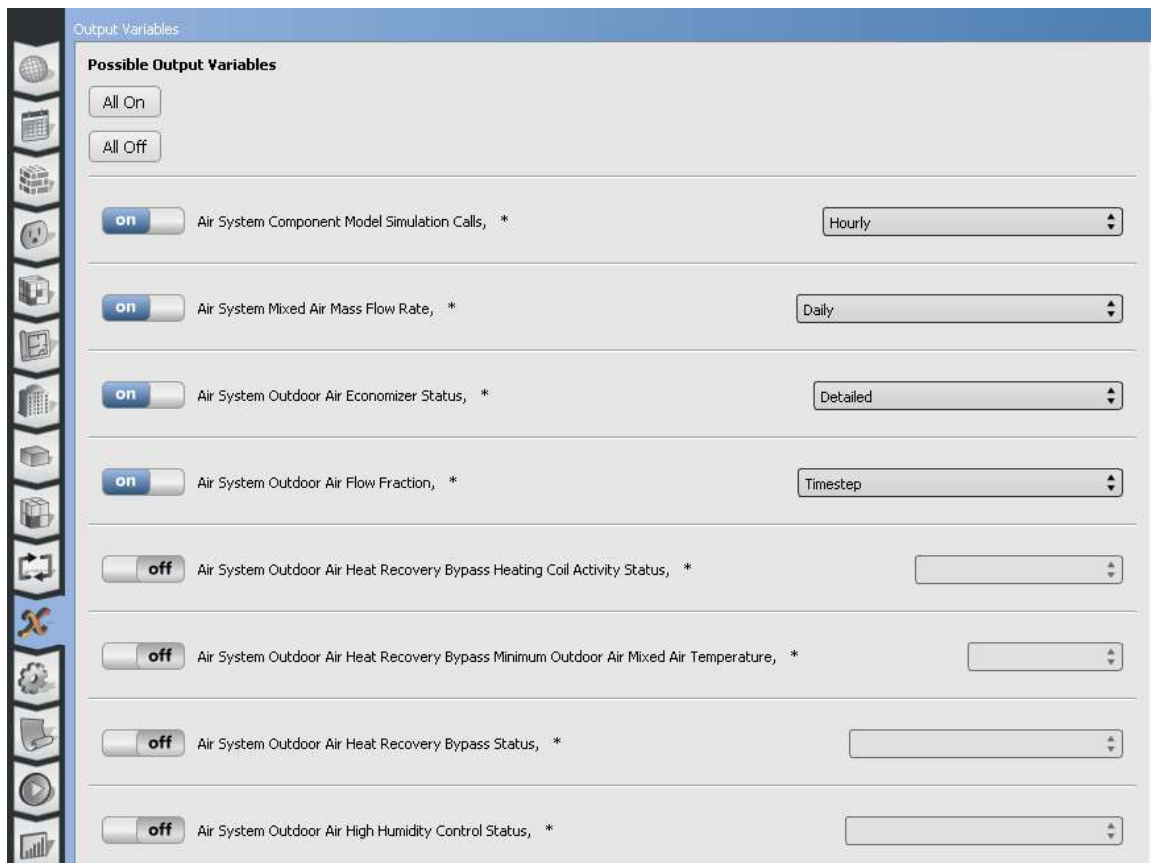
Fonte: Autor

4.6.1.11. OUTPUT VARIABLES

Esta aba serve para escolha dos parâmetros que o projetista deseja visualizar nos resultados das simulações e a taxa de amostragem de cada uma delas.

Como a lista de variáveis é extensa e é apresentada em ordem alfabética, escolher os parâmetros de interesse é um processo desgastante. A aba Measures (que será apresentada mais adiante) permite a utilização de uma lista de variáveis de interesse pré-definida por outros usuários, apenas com os dados mais pertinentes.

Figura 17: Aba Output Variables – Openstudio

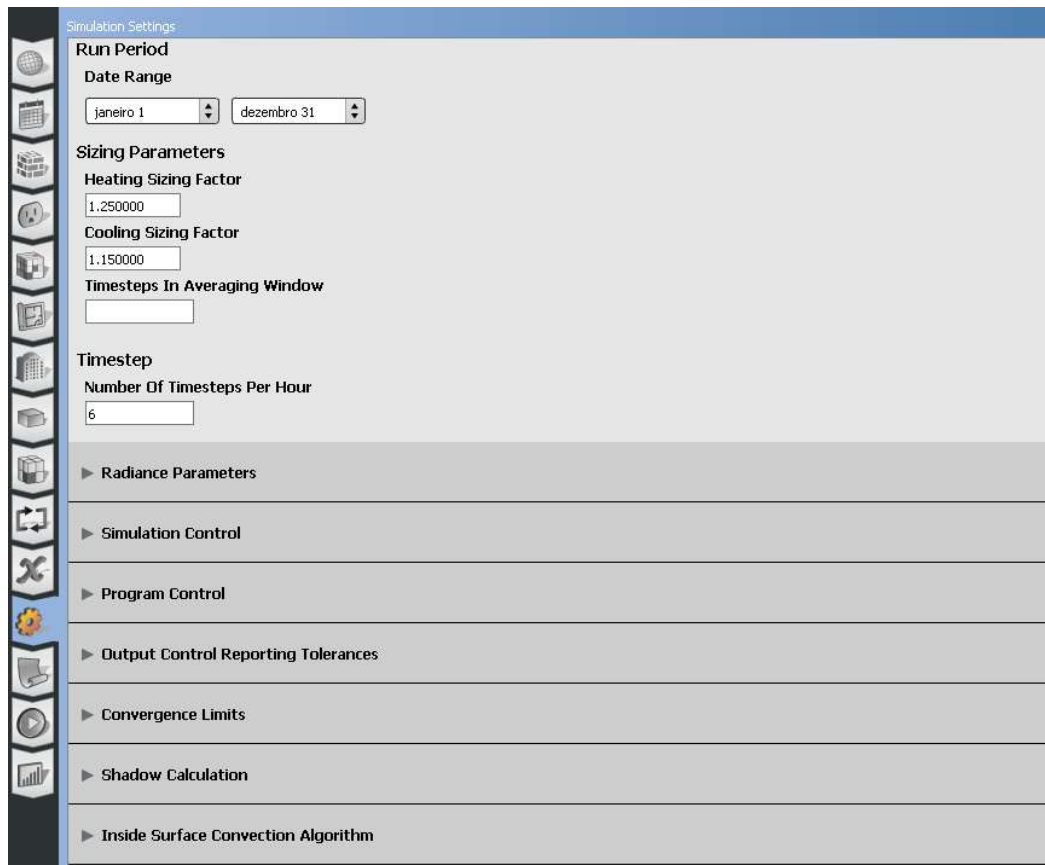


Fonte: Autor

4.6.1.12. SIMULATION SETTINGS

Esta aba é destinada para definição das configurações de simulação, como período de tempo avaliado, taxa de amostragem e fatores de segurança adotados. Também aqui podem ser modificadas características dos cálculos intermediários, como dinâmica de temperatura e efeito do sombreamento.

Figura 18: Aba Simulation Settings – Openstudio



Fonte: Autor

4.6.1.13. MEASURES

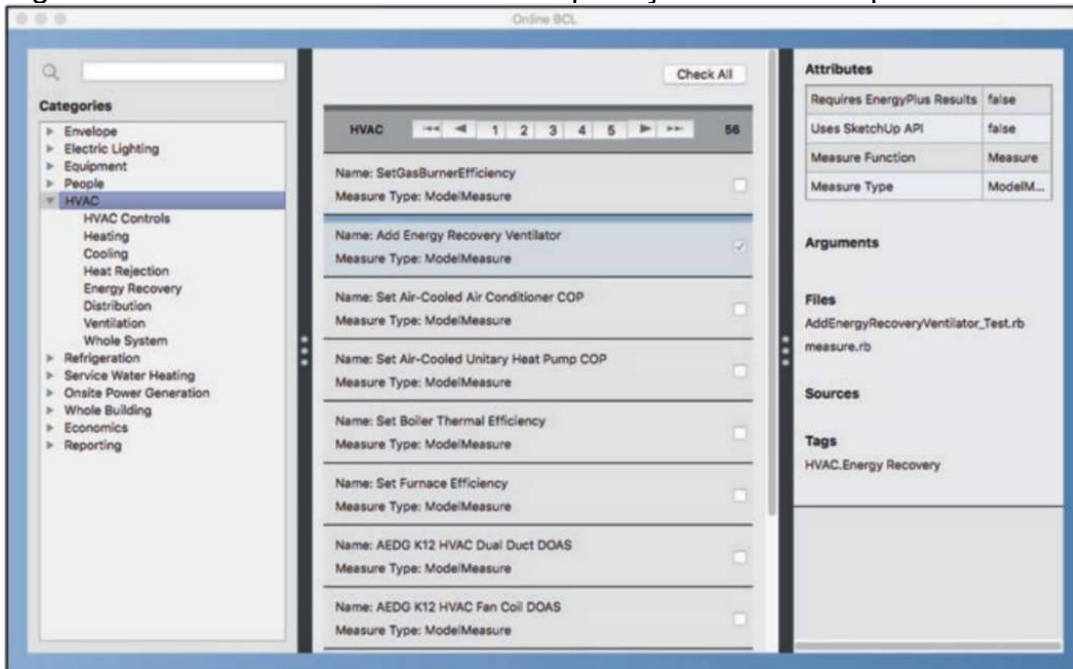
A aba measure é utilizada para possibilitar a aquisição de medições personalizadas através da importação de scripts disponíveis em um relatório online denominado Building Component Library (BCL).

Figura 19: Aba Measures - Layout geral – Openstudio



Fonte: Autor

Figura 20: Aba Measures - Janela de importação do BCL – Openstudio

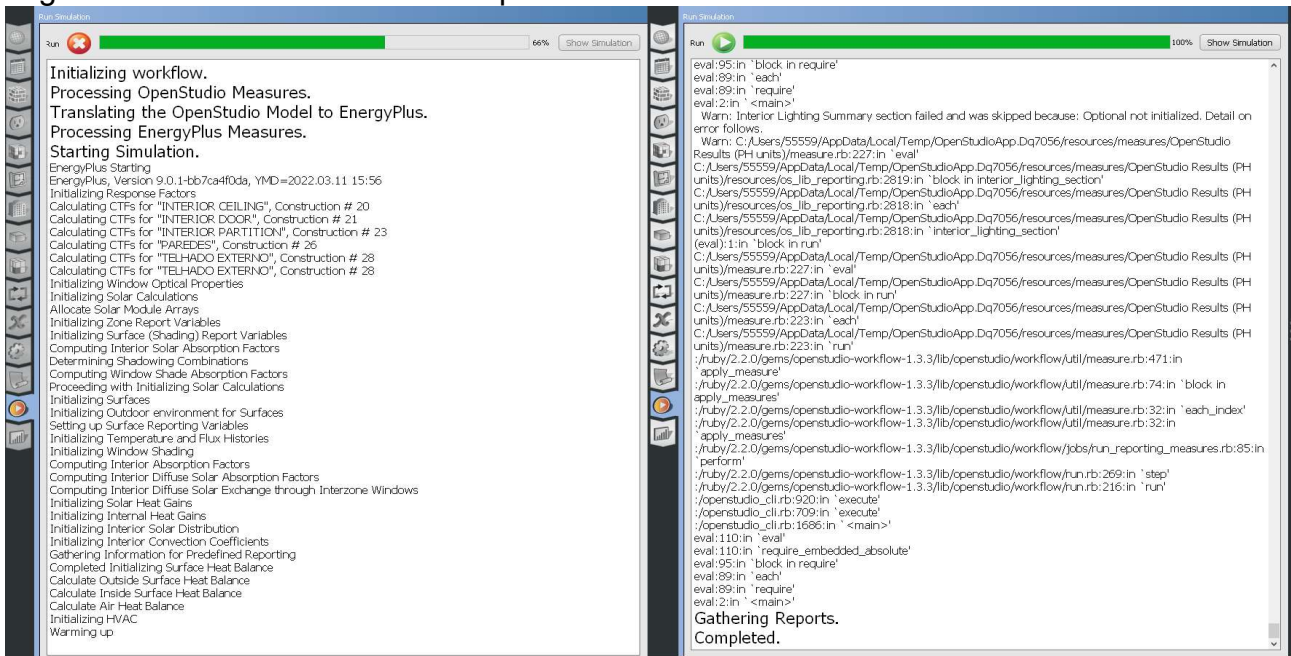


Fonte: Autor

4.6.1.14. RUN SIMULATION

Este item é destinado para a simulação, apresentando o andamento do processo e exibição de possíveis erros encontrados.

Figura 21: Aba Run Simulation - Openstudio



Fonte: Autor

4.6.1.15. RESULTS SUMMARY

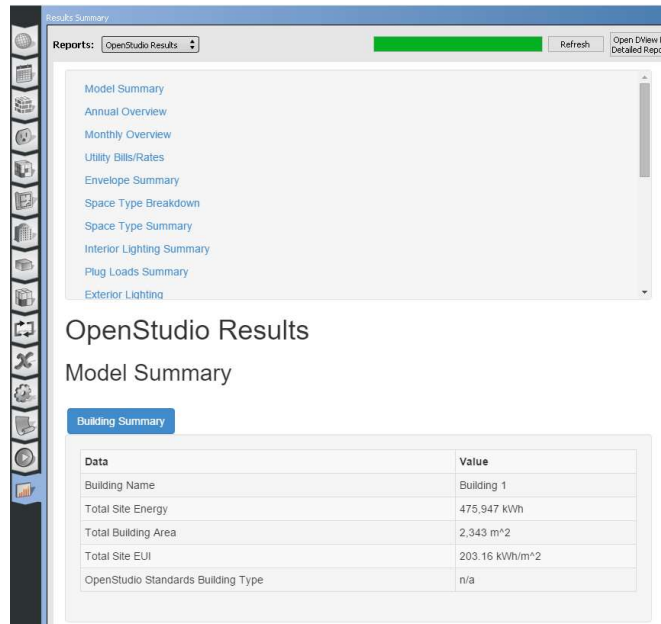
Por fim, nesta aba são apresentados os resultados das simulações de acordo com o definido nas abas Output Variables e Measures.

Podem ser visualizados os relatórios gerados tanto pelo Openstudio (Figura 22) quanto pelo Energyplus (Figura 23). Os resultados do Openstudio possuem um maior nível de organização e qualidade visual, além de que o software realiza a conversão das variáveis automaticamente para as unidades do Sistema Internacional de Unidades, por isso se dá preferência a análise deste relatório.

Nestes reports os dados podem ser exibidos em tabelas ou de forma gráfica, facilitando a interpretação do projetista.

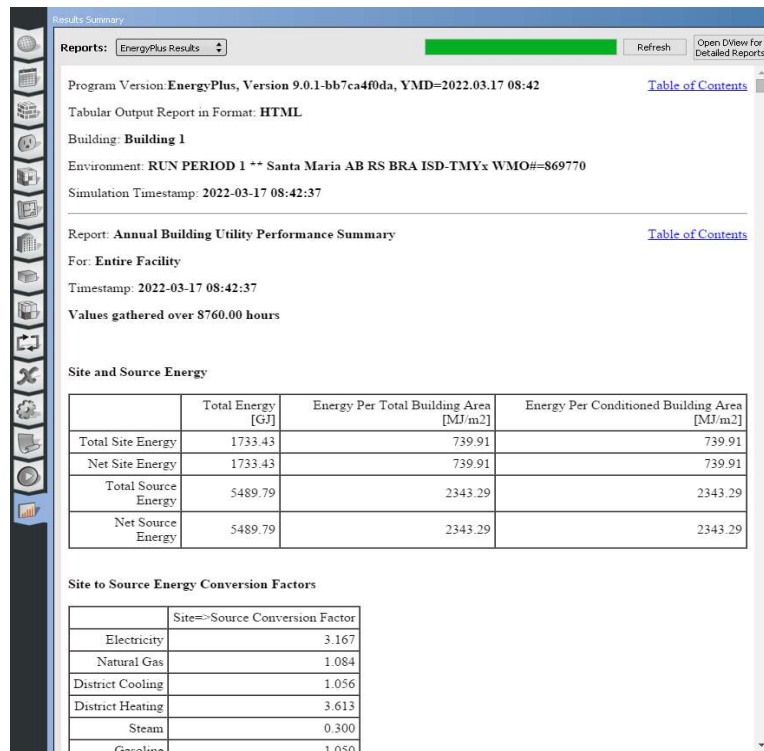
Dentre os dados mais cruciais para serem avaliados nos resultados temos o consumo energético (Figura 24, Figura 30 e Figura 26) e a temperatura interna dos ambientes, comprovando o correto dimensionamento do sistema projetado (Figura 27).

Figura 22: Relatório de resultados - Openstudio



Fonte: Autor

Figura 23: Relatório de resultados - Energyplus



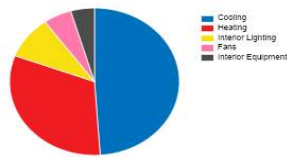
Fonte: Autor

Figura 24: Resultados tabelados e graficos referente ao consumo anual total de energia - Openstudio

Annual Overview

End Use - view table

End Use	Consumption (kWh)
Heating	151,339
Cooling	232,889
Interior Lighting	44,600
Exterior Lighting	0
Interior Equipment	21,503
Exterior Equipment	0
Fans	25,617
Pumps	0
Heat Rejection	0
Humidification	0
Heat Recovery	0
Water Systems	0
Refrigeration	0
Generators	0



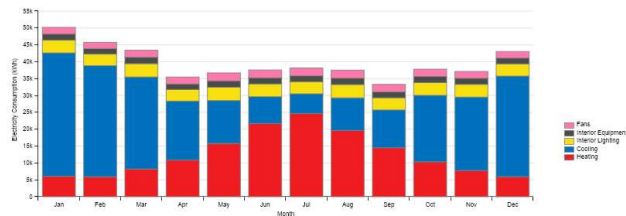
Fonte: Autor

Figura 25: Resultados tabelados e graficos referente ao consumo mensal de energia - Openstudio

Monthly Overview

Electricity Consumption (kWh) - view table

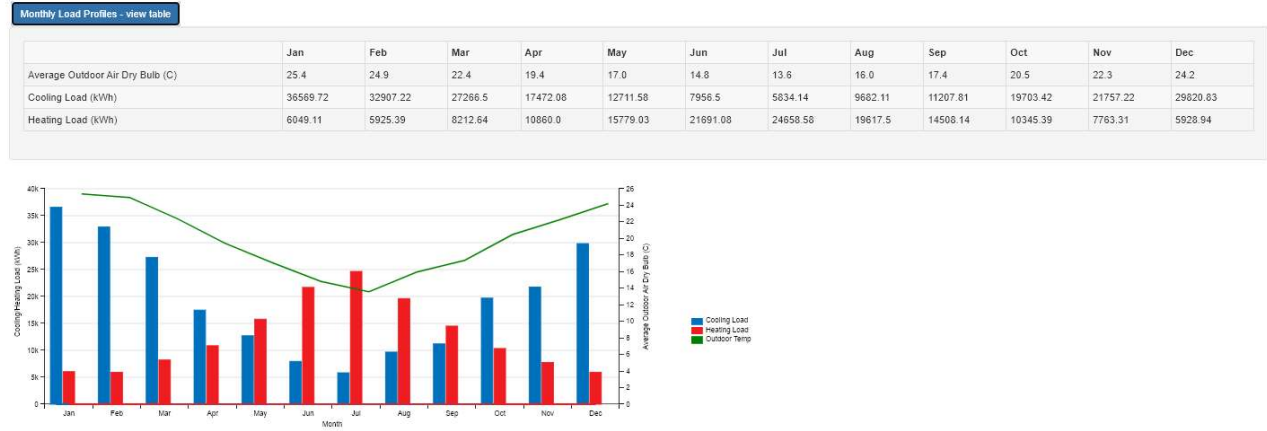
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Heating	6049.11	5925.39	8212.64	10880.0	15779.03	21691.08	24658.58	19617.5	14508.14	10345.39	7763.31	5928.94	151339.11
Cooling	36589.72	32907.22	27266.5	17472.08	12711.58	7956.5	5834.14	9682.11	11207.81	19703.42	21757.22	29820.83	232889.14
Interior Lighting	3769.31	3430.75	3949.86	3430.75	3938.61	3780.58	3600.03	3938.61	3611.28	3769.31	3769.31	3611.28	44599.67
Exterior Lighting													
Interior Equipment	1818.86	1654.09	1902.85	1654.09	1901.25	1820.46	1736.48	1901.25	1738.08	1818.86	1818.86	1738.08	21503.24
Exterior Equipment													
Fans	1981.16	1824.08	2083.99	2046.0	2358.22	2306.94	2313.8	2370.44	2216.53	2167.08	2011.33	1936.43	25615.99
Pumps													
Heat Rejection													
Humidification													
Heat Recovery													
Water Systems													
Refrigeration													
Generators													
Total	50188.16	45741.53	43415.84	35462.93	36688.69	37555.57	38143.03	37509.91	33281.84	37804.05	37120.03	43035.56	475947.14



Fonte: Autor

Figura 26: Resultados tabelados e graficos referente ao consumo de energia destinada a climatização (aquecimento e arrefecimento) e temperatura ambiente externa - Openstudio

HVAC Load Profiles



Fonte: Autor

Figura 27: Condição de temperatura ao longo do ano por zona térmica (número de horas em determinado range de temperatura) - Openstudio

Zone Conditions

Temperature (Table values represent hours spent in each temperature range)

Zone	Unmet Htg (hr)	Unmet Htg - Occ (hr)	< 13 (C)	13-16 (C)	16-19 (C)	19-20 (C)	20-21 (C)	21-22 (C)	22-23 (C)	23-24 (C)	24-26 (C)	26-28 (C)	28-31 (C)	>= 31 (C)
ADMINISTRAÇÃO	18	18	0	155	1631	830	762	875	890	2371	1246	0	0	0
AUDITÓRIO	43	0	0	1166	3811	340	62	1	522	2774	84	0	0	0
BIBLIOTECA	48	0	0	644	2864	1073	653	298	451	2248	729	0	0	0
SALA DE AULA - NORTE	0	0	3	1296	3513	499	68	1	235	3046	99	0	0	0
SALA DE AULA - SUL	0	0	9	1965	3268	131	7	0	255	3111	14	0	0	0
SALA DE PROFESSOR - LESTE	14	14	0	13	966	795	884	757	1234	2512	1599	0	0	0
SALA DE PROFESSOR - NORTE	12	12	0	3	1023	1077	1160	1345	803	2051	1298	0	0	0
SALA DE PROFESSOR - SUL	15	15	0	121	1375	705	736	698	983	2576	1562	4	0	0

Fonte: Autor

4.6.2. SKETCHUP

O SketchUp é uma ferramenta de modelagem 3D pertencente a empresa Trimble Inc, muito utilizado nas áreas de arquitetura, design de interiores e design industrial.

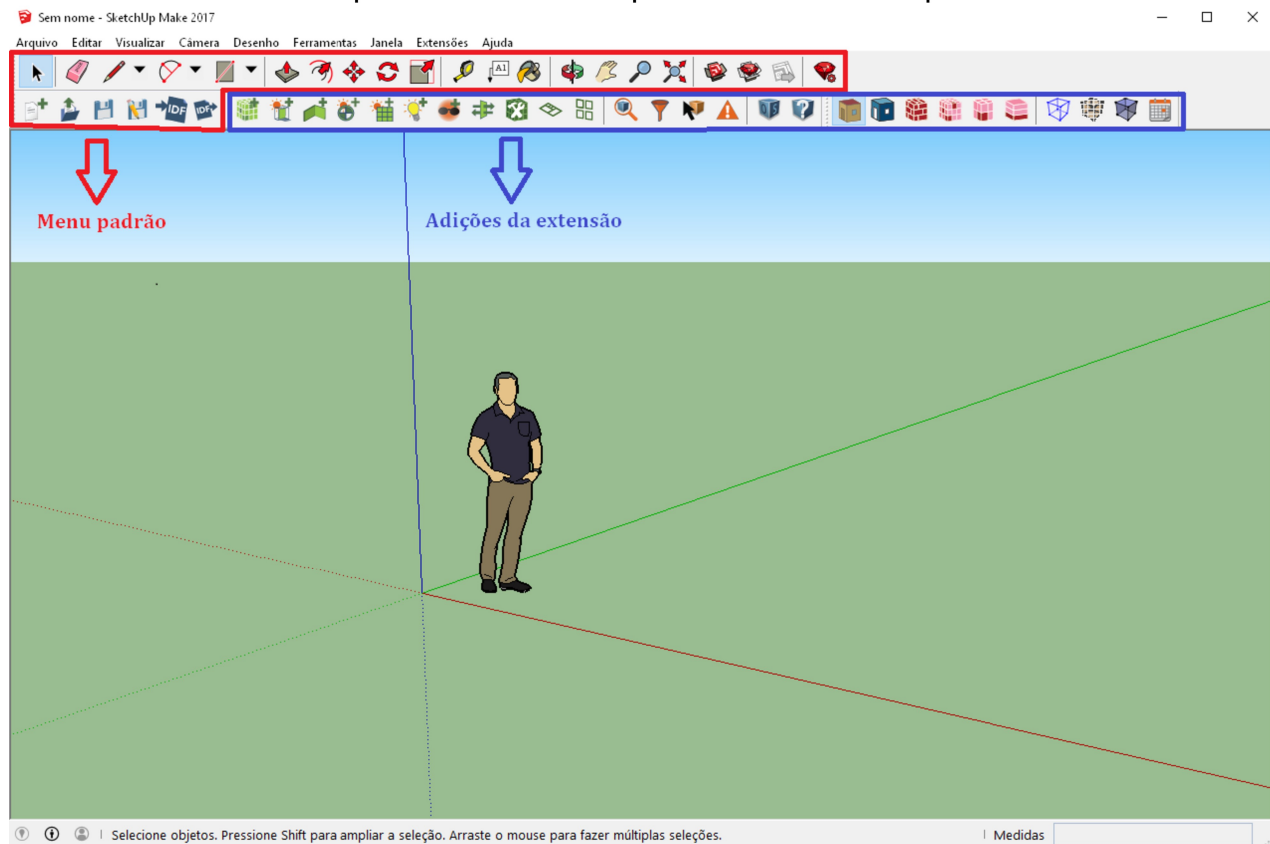
A partir de uma extensão para este software, disponível gratuitamente no site do OpenStudio, é possível compatibilizar um arquivo entre os OpenStudio e SketchUp, essa extensão também adiciona diversas ferramentas permitem a modelagem térmica no SketchUp. O layout geral do aplicativo pode ser visualizado na Figura 28.

O programa dispõe naturalmente de diversas ferramentas de desenho em uma interface intuitiva que permitem modelar grandes edificações com relativa facilidade, principalmente quando comparado com a metodologia de modelagem do Openstudio.

A extensão adicionada permite definir e modificar características térmicas de cada ambiente, como definição de Space Types, materiais das construções e zonas térmicas (alguns dos menus de modificações de espaços e construções podem ser visualizados na Figura 29, Figura 30 e Figura 31), contudo a definição destas características é mais simples de ser realizada no software OpenStudio.

Por estes motivos optou-se por construir a edificação (modelo 3D) no Sketchup e exportá-la para o OpenStudio para realização da modelagem térmica.

Figura 28: Layout geral com destaque para a barra de ferramentas padrão e a barra de ferramentas adicionada pela extensão do OpenStudio - SketchUp

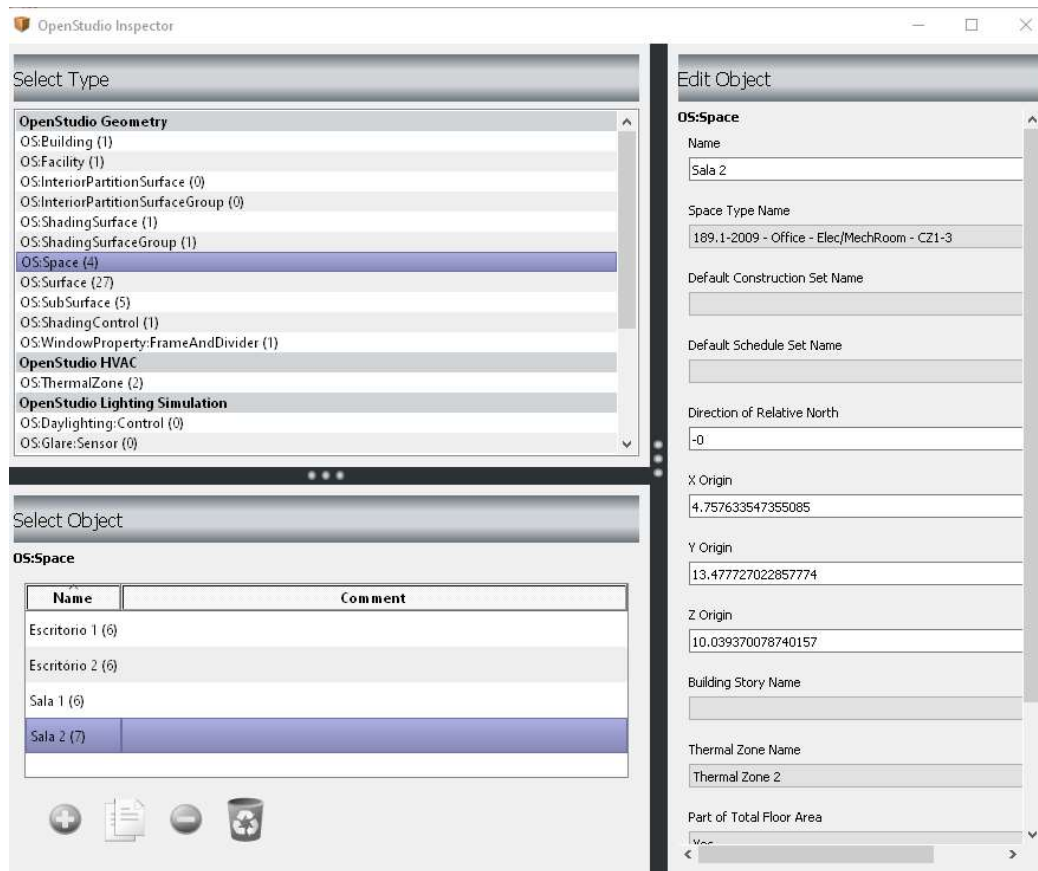


Fonte: Autor

Outra funcionalidade do software para modelagens e análises térmicas é a possibilidade da visualização em 3D de algumas situações, como a visão edificação

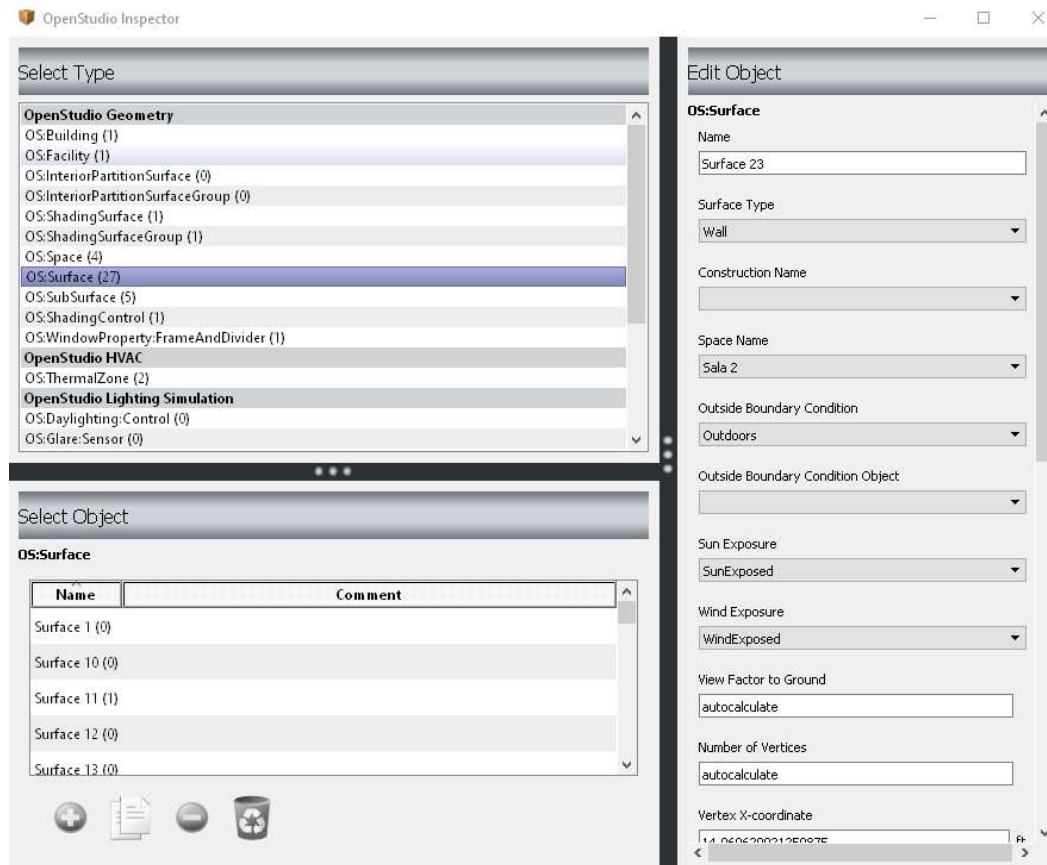
construída (Figura 32), a localização das zonas térmicas criadas (Figura 33) e o sombreamento/insolação ao longo do dia e do ano (Figura 34).

Figura 29: Menu de edição de spaces - SketchUp



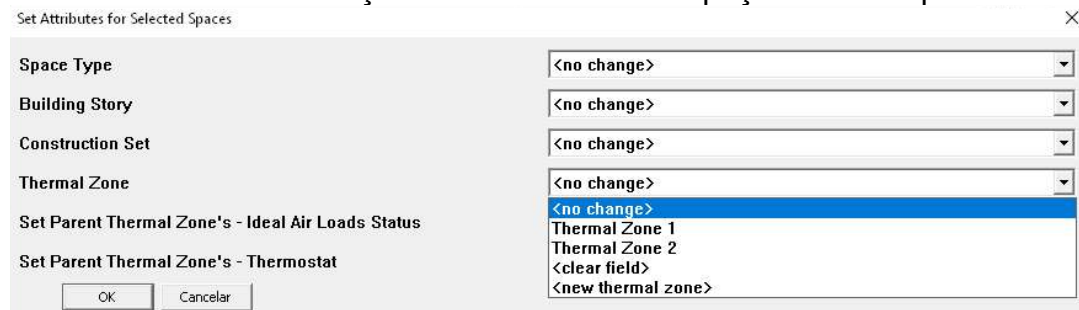
Fonte: Autor

Figura 30: Menu de edição de Superfícies - SketchUp



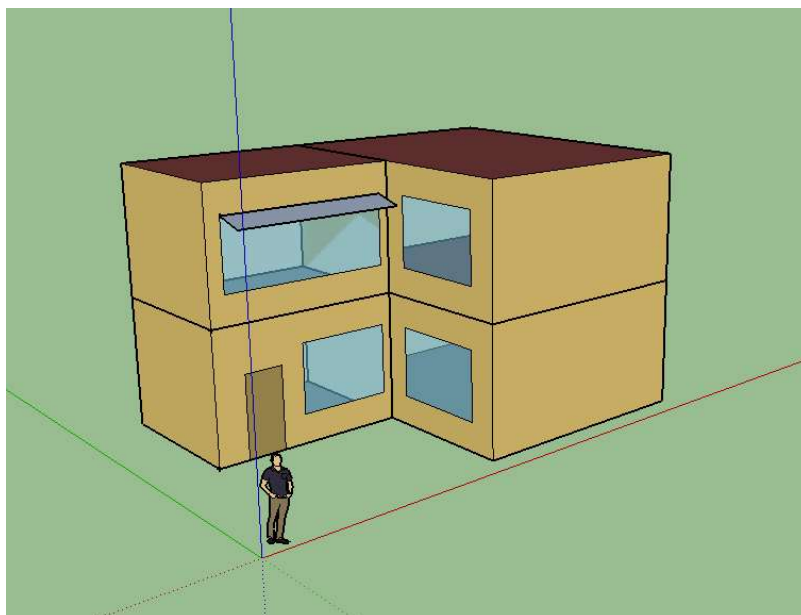
Fonte: Autor

Figura 31: Menu de modificação de fatores de um espaço - SketchUp



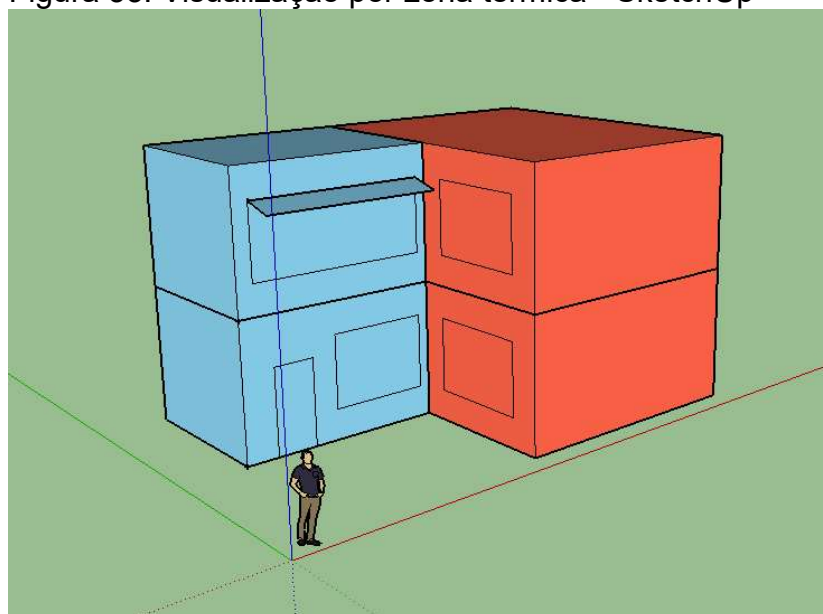
Fonte: Autor

Figura 32: Edificação modelada no software - SketchUp



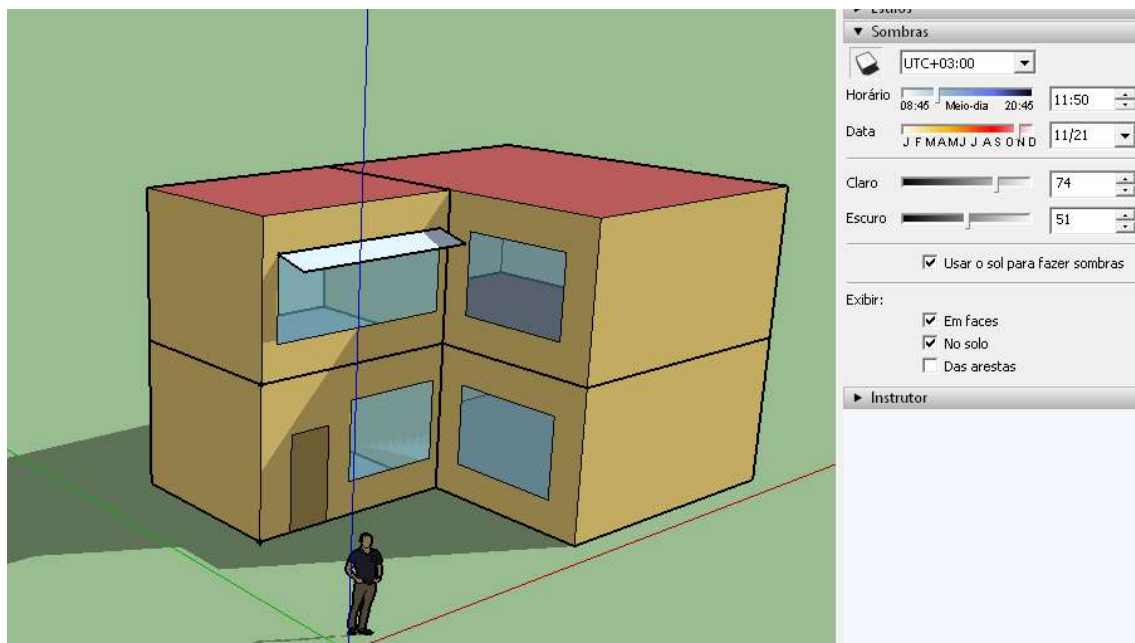
Fonte: Autor

Figura 33: Visualização por zona térmica - SketchUp



Fonte: Autor

Figura 34: Visualização de sombreamento - SketchUp



Fonte: Autor

4.7. ANÁLISE ECONÔMICA

Para validação da maioria dos projetos de engenharia, é necessário comprovar que haverá uma economia ou um retorno financeiro com o passar do tempo.

Neste trabalho, os diferentes cenários propostos possuem vida útil distintas, de modo que a escolha do método de análise deve ser cuidadosamente escolhida. Optou-se pelo uso do Valor Anual Equivalente (VAE).

O cálculo do VAE consiste em distribuir o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto em um fluxo de receitas anual (ou periódico) equivalente, permitindo assim comparar projetos de diferentes durabilidades.

O cálculo do VPL consiste em trazer em valores presentes os gastos envolvidos no investimento, tanto o valor inicial como os custos ou rentabilidade ao longo do tempo, tudo isto levando em consideração a “taxa mínima de atratividade (TMA)”.

Esta TMA representa o rendimento de um investimento, o juros de um financiamento ou a rentabilidade de outro investimento (por exemplo). Pode ser entendida como a mínima taxa de lucro desejada ou a máxima taxa de juros disposta a ser paga pelo investidor.

O cálculo do VAE é realizado de acordo com a equação a seguir:

$$VAE = \frac{VPL \cdot [(1+i)^t - 1]}{1 - (1+i)^{-n \cdot t}}$$

Onde:

$$VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{F_{cn}}{(1+i)^n}$$

Em que:

VAE = Valor anual equivalente;

VPL = Valor presente líquido;

t = Número de períodos de capitalização;

n = Período de tempo;

i = Taxa mínima de atratividade;

F_{cn} = Fluxo de caixa.

Para considerarmos o VAE de um período de um ano, utilizamos t = 1, de modo que:

$$VAE = \frac{VPL \cdot [(1+i) - 1]}{1 - (1+i)^{-n}}$$

Existem três possíveis resultados neste cálculo, sendo eles:

- VAE < 0, representando a situação onde as despesas superam as receitas, ou seja, o projeto é inviável economicamente e resulta em um prejuízo (para o período analisado) igual ao módulo de VPL;
- VAE = 0, quando as despesas e a receita são iguais;
- VAE > 0, quando o lucro do projeto supera as despesas, indicando um lucro (em valor presente ao final do período) igual ao VPL.

4.8. SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

Para a climatização de um ambiente, diferentes sistemas podem ser utilizados, de acordo com a necessidade e singularidades da aplicação.

Dentre os possíveis sistemas de climatização podemos citar o uso de equipamentos splits (individuais), multi-splits, sistemas com fluxo de gás refrigerante variável (VRV ou VRF), sistemas utilizando Tipo Fan-coil, Chiller, dentre outros.

Neste trabalho, serão estudados duas metodologias de climatização, uma com equipamentos splits e outra com um sistema VRV.

A seguir será apresentado um breve resumo sobre o funcionamento destes sistemas e suas principais características.

4.8.1. SISTEMA SPLIT

Um sistema split é composto de dois equipamentos: uma unidade condensadora (externa) e uma unidade evaporadora (interna) conectadas por uma tubulação de cobre.

Esse sistema é amplamente utilizado devido ao seu baixo custo de aquisição e instalação, não sendo necessário mão de obra especializada ou reformas de grande porte. A desvantagem deste tipo de equipamento está relacionado a não haver um ar de renovação circulando, isto é, não existe um fluxo de ar externo para dentro do ambiente.

O estudo deste sistema neste trabalho ocorre devido aos equipamentos atualmente instalados na edificação a ser avaliada serem, majoritariamente, splits do tipo hi-wall, e a substituição destes equipamentos seria simples e com baixo custo de aquisição e mão-de-obra.

4.8.2. SISTEMA VRV

Um sistema de ar variável é constituído de uma condensadora externa que alimenta diversas evaporadoras internas a edificação, onde cada uma opera de forma individual.

Apesar de requerer um investimento inicial maior e uma mão de obra especializada para a instalação, um sistema VRV apresenta uma eficiência energética superior a

equipamentos individuais (splits), podendo ter essa eficiência maximizada através de um sistema de automação com controle de fluxo de ar e temperatura.

A viabilidade da utilização de um sistema VRV será avaliada devido a alta economia de energia obtida em sua ação, fator este que é um dos focos deste trabalho.

Com as informações apresentadas nesta seção é possível compreender as normas referentes a cálculos de carga térmica e limites de conforto térmico. O conhecimento destes dados permite projetar corretamente uma edificação no software OpenStudio com o auxílio do Sketchup.

Após a modelagem de uma edificação é adequado realizar uma avaliação, a partir da carga térmica demandada por sala (ou zona térmica), de qual solução de sistema de climatização é mais adequada, tanto em relação a conforto térmico como em questões financeiras. Para a realização da análise financeira podem ser aplicado alguma metodologia de cálculo comparativo entre os cenários avaliados, como o calculo do VAE apresentado nesta seção.

Com a base teórica utilizada no trabalho devidamente apresentada, pode-se proceder para o estudo de caso e as etapas de projeto determinadas.

5. METODOLOGIA

Neste trabalho, o anexo C do Centro de Tecnologia será adotado como estudo de caso para o dimensionamento de um sistema de climatização adequado.

Foram levantados os dados físicos e ocupacionais de cada uma das salas de aula, do auditório e da biblioteca pertencentes ao anexo de modo a ser possível modelar a edificação e as cargas existentes nos programas anteriormente mencionados.

O projeto será realizado seguindo as etapas conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Etapas a serem realizadas

Etapa	Nome	Descrição
1	Modelagem 3D	Construir a edificação a ser analisada no SketchUp.
2	Modelagem de carga	Definir as cargas existentes em cada sala ao longo do dia e registrá-las no OpenStudio.
3	Definição das zonas térmicas	Realizar a comparação entre as salas e agrupar as que possuem características de carga, dimensões e orientações geográficas semelhantes em zonas térmicas.
4	Simulação do caso base	Realizar a simulação do projeto e verificar as variáveis associadas ao conforto térmico.
5	Simulação com sistema de climatização	Adicionar um sistema de climatização ao projeto. Simular e avaliar os novos resultados.
6	Análise de sensibilidade	Realizar modificações estruturais ao projeto e verificar o efeito obtido sobre a carga térmica incidente e o dimensionamento do sistema de climatização.
7	Análise econômica	Comparar economicamente as opções de climatização para o ambiente avaliado.

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.1. ETAPAS DO PROJETO

5.1.1. MODELAGEM 3D

Utilizando as plantas arquitetônicas do Anexo C do Centro de Tecnologias, realizou-se o desenho 3D da edificação no Sketchup, considerando todas as portas, janelas, partições internas e estruturas adjacentes que podem ocasionar sombreamento.

5.1.2. MODELAGEM DE CARGA

A partir de um levantamento sobre ocupação, infiltração de ar, equipamentos eletrônicos, iluminação e horário de funcionamento das salas do prédio avaliado, registrou-se tais características no arquivo do projeto (OpenStudio) como cargas ou cronogramas.

Nesta etapa também realizou-se a modelagem das construções da edificação (paredes, pisos, janelas, etc.) e a definição das características climatológicas e geográficas da região de Santa Maria.

5.1.3. DEFINIÇÃO DE ZONAS TÉRMICAS

Comparando as salas modeladas, realizou-se o agrupamento dos ambientes com cargas e dimensões físicas semelhantes e mesma orientação geográfica (paredes externas voltadas para o mesmo lado) em zonas térmicas.

5.1.4. SIMULAÇÃO DO CASO BASE

Com o modelo 3D feito e as características de cargas registradas, é possível realizar a simulação.

Inicialmente não foi adicionado nenhum sistema de climatização, de modo que a simulação apenas determinará a carga térmica incidente e as características de temperatura e umidade ao longo do ano.

5.1.5. SIMULAÇÃO COM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

Em seguida adiciona-se um sistema de climatização para o projeto e simula-se novamente, com isso será obtido a potência demandada (máxima e horaria) durante o período de análise. Este dado pode ser utilizado para determinação dos equipamentos a serem utilizados para a climatização ser possível.

5.1.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O objetivo desta etapa é visualizar se ocorre uma redução considerável na demanda energética destinada a climatização com a modificação de alguma característica física da edificação avaliada, visando reduzir os custos de aquisição e operação dos equipamentos.

Pelo conhecimento sobre a região, sabe-se que ao longo do ano o maior uso dos equipamentos de climatização é voltado para a redução de temperatura (arrefecimento), deste modo, priorizou-se então modificações físicas que reduzam a carga térmica incidente durante o verão.

Serão avaliados três diferentes cenários, sendo eles a substituição dos vidros por vidros absorventes escuros, substituição dos vidros por vidros refletores e redução do pé-direito das salas.

5.1.6.1. SUBSTITUIÇÃO DOS VIDROS DE JANELAS POR VIDROS ABSORVENTES;

O Vidro Absorvente possui um coeficiente de absorção elevado, intensificado pela coloração escura, de modo que a carga térmica incidente se dissipe tanto para dentro como para fora da edificação, assim a energia solar não incide totalmente nas salas, reduzindo a temperatura interna.

5.1.6.2. SUBSTITUIÇÃO DOS VIDROS DE JANELAS POR VIDROS REFLETORES;

O Vidro Refletor é um vidro que possui uma face “espelhada”, é muito utilizado a fim de se reduzir o consumo de energia elétrica em iluminação e refrigeração pois a face

espelhada faz com que o coeficiente de refletividade se eleve, reduzindo a carga térmica por radiação solar incidente sobre a sala.

5.1.6.3. REDUÇÃO DO PÉ-DIREITO DE 360 CM PARA 260 CM.

A redução do pé-direito das salas reduz a potência requerida para climatização devido a dois fatores: Redução da área de superfície externa e redução da condutividade térmica entre pavimentos (Ver Equação (1)).

A carga térmica transmitida para dentro de um ambiente por condução é diretamente proporcional a área de exposição das salas, logo reduzindo a superfície externa reduz-se a carga térmica incidente.

Após o rebaixamento, entre cada pavimento haverá a divisória original, uma camada de ar (100 cm para o caso avaliado) e a divisória adicionada. A resistência térmica equivalente entre os pavimentos será a soma das resistências térmicas de cada uma destas camadas (ressaltando que a camada de ar terá um valor elevado de resistência térmica), assim a carga térmica transmitida entre pavimentos é reduzida, evitando que salas não climatizadas (ou a superfície superior da edificação, no caso do pavimento superior) gerem um aquecimento nas salas adjacentes acima ou abaixo.

5.1.7. ANÁLISE ECONÔMICA

Com os resultados de consumos energético obtidos nas simulações para cada caso mencionado anteriormente, é possível realizar a comparação econômica com o consumo estimado do sistema de climatização atualmente instalado na edificação.

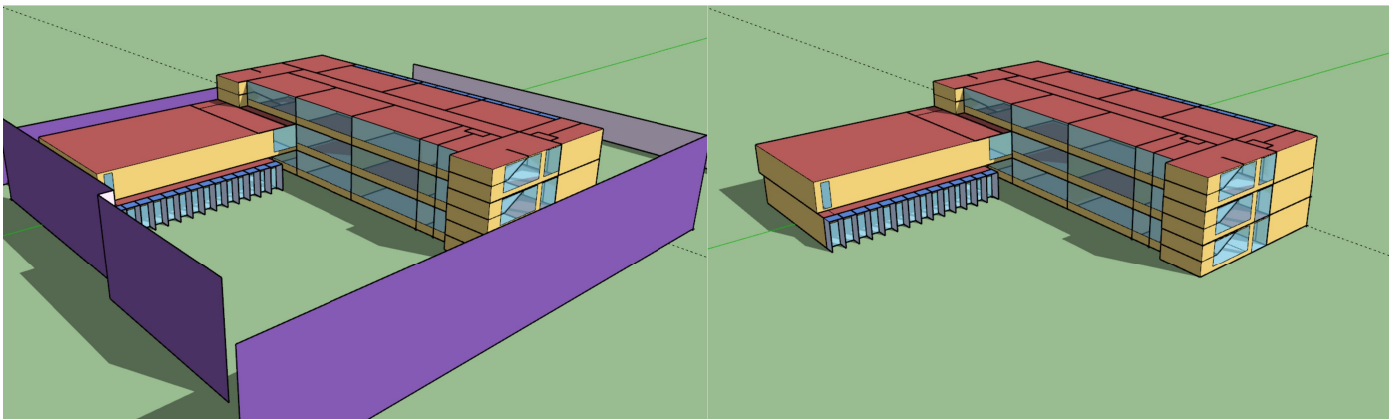
A análise de viabilidade será realizada considerando o retorno financeiro em relação e economia de gastos com consumo de energia elétrica, utilizando o cálculo do Valor Presente Líquido.

5.2. MODELAGEM 3D

A partir da planta referencia da edificação avaliada, elaborou-se o modelo 3D do prédio. Neste modelo são consideradas, além das paredes externas e internas, as paredes de divisórias presentes nas salas de professores, também representam-se as construções adjacentes ao prédio, sendo elas o Centro de Tecnologia (9.5 m a leste), o anexo B do Centro de Tecnologia (4.3 m ao sul), o Ctlab (5.7 m a oeste) e o INPE (26 m ao norte).

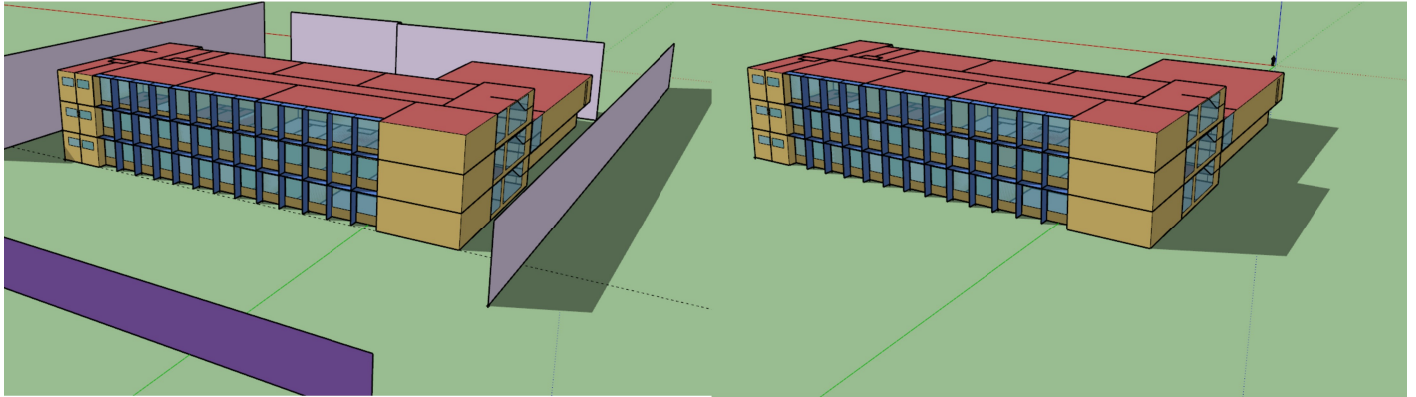
O modelo projetado pode ser visualizado na Figura 35 e na Figura 36. Nestas figuras observa-se o edifício, o posicionamento de janelas e brises o sombreamento ocasionado pelas estruturas adjacentes, representados como paredes planas). Na Figura 35 é apresentada a visão das fachadas leste e sul enquanto a Figura 36 apresenta as faces norte e oeste da edificação.

Figura 35: Anexo C - Fachada leste/sul



Fonte: Autor

Figura 36: Anexo C - Fachada norte/oeste



Fonte: Autor

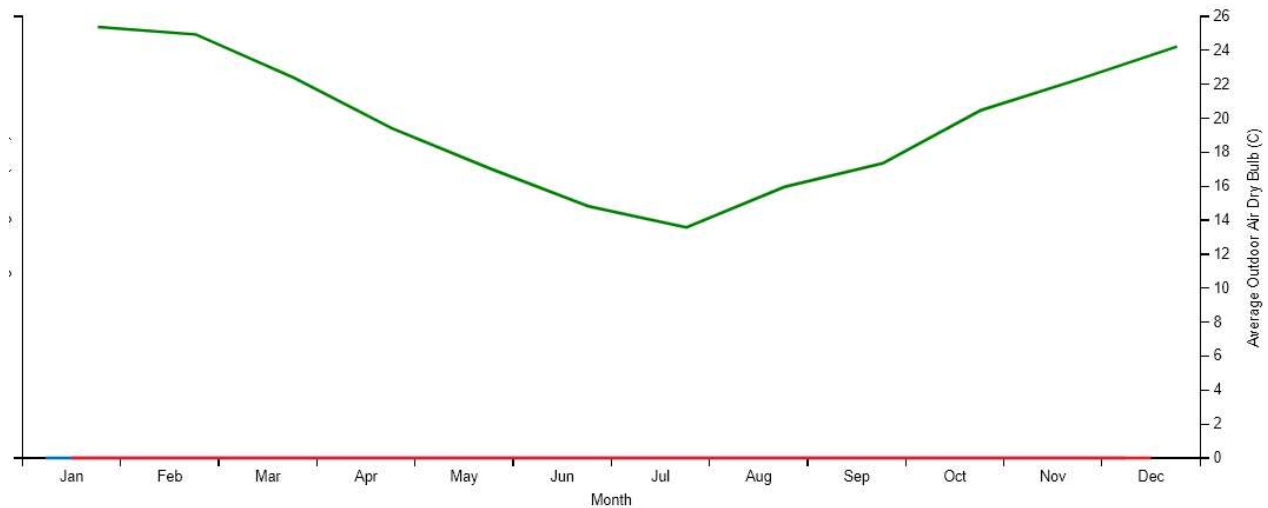
5.3. MODELAGEM DE CARGA

5.3.1. DADOS CLIMATOLÓGICOS

Para utilização no OpenStudio/EnergyPlus, os dados climatológicos são obtidos através do banco de dados do INPE em um arquivo .ddy contendo o registro de temperatura média e máxima de bulbo seco e úmido, faixa de variação de temperatura diária, umidade relativa do ar, pressão barométrica, velocidade e direção do vento, intensidade e ângulo de incidência solar com variação horária e sazonal. Além disso o arquivo apresenta o posicionamento geográfico da cidade na qual o ambiente em estudo está inserido, contendo sua latitude, longitude e elevação.

A Figura 37 apresenta o resultado gráfico gerado no OpenStudio quanto a temperatura de bulbo seco do ambiente durante o ano de acordo com os dados climáticos utilizados.

Figura 37: Temperatura ambiente anual na cidade de Santa Maria – RS



Fonte: Autor

5.3.2. OCUPAÇÃO DAS SALAS

Para a carga proveniente da ocupação dos ambientes, considerou-se as capacidades máximas das salas de aula (número de assentos), o número de postos de trabalho em cada sala de professores e a densidade de ocupação para corredores, biblioteca e auditório foram definidas conforme acordo com a Tabela 7.

O tempo de ocupação de cada sala foi determinado de acordo com os horários típicos de aulas e funcionamento do setor administrativo do Centro de Tecnologia. O cronograma de ocupação do auditório foi determinado como sendo eventual, uma vez por semana durante um período de 5 horas.

Tabela 13: Ocupação, *horário* de uso e calor gerado por tipo de atividade de cada ambiente.

Sala	Ocupação	Horário de uso (Dias de semana)	Tipo de atividade exercida	Calor gerado (W)
Sala de aula 1	44 pessoas	07:00 – 12:30 13:30 – 17:30	Sentado (Lendo) Trabalho leve (escritório)	108
Sala de aula 2 Sala de aula 3 Sala de aula 4 Sala de aula 5 Sala de aula 6 Sala de aula 7 Sala de aula 8 Sala de aula 10 Sala de aula 11	54 pessoas	07:00 – 12:30 13:30 – 17:30	Sentado (Lendo) Trabalho leve (escritório)	108
Sala de aula 9	66 pessoas	07:00 – 12:30 13:30 – 17:30	Sentado (Lendo) Trabalho leve (escritório)	108
Sala de prof. 1-2 Sala de prof. 3-4 Sala de prof. 5-6 Sala de prof. 7-8 Sala de prof. 9-10 Sala de prof. 11-12 Sala de prof. 13-14 Sala de prof. 18-19 Sala de prof. 20-21 Sala de prof. 22-23 Sala de prof. 24-25 Sala de prof. 26-27 Sala de prof. 28-29 Sala de prof. 30-31 Sala de prof. 32-33 Sala de prof. 34-35	4 pessoas	8:00 – 12:00 13:00 – 16:00	Sentado (Lendo) Trabalho leve (escritório)	108
Sala de prof. 15-16-17	6 pessoas	8:00 – 12:00 13:00 – 16:00	Sentado (Lendo) Trabalho leve (escritório)	108
Administração	2 Pessoas	8:00 – 12:00 13:00 – 16:00	Sentado (Lendo) Trabalho leve (escritório)	108
Auditório	333 pessoas	15:00 – 20:00 Sexta-feira apenas	Sentado (relaxado)	99
Biblioteca	0.1 pessoa/ m ²	8:00 – 19:30	Sentado (Lendo) Trabalho leve (escritório)	108

Fonte: Elaborado pelo Autor

O cadastro dos dados de carga por nível de atividade e horário de ocupação das salas no OpenStudio ocorre por meio de cronogramas (schedules), onde é apresentado a ocupação da sala (em uma escala de 0 a 1) de modo que as cargas pela atividade dos ocupantes e o uso de equipamentos elétricos iluminação são proporcionais ao valor aplicado

em cada horário. As Figura 38 e Figura 39 apresentam o registro destes dados para as salas de professores. Vale perceber que o nível de atividade é constante durante todo o período, pois nos cálculos realizados pelo programa multiplica-se este valor pelo número de ocupantes das salas e pela ocupação das mesmas. Outro fator a ser destacado é a existência de dois schedules de ocupação diferentes, um para dias de semana e outros para sábado e domingo, o primeiro pode ser visualizado em azul nas figuras abaixo, enquanto o segundo possui cor roxa e é sempre mantido em zero.

A Figura 40 apresenta os valores de cargas cadastrados para as salas de professores, dentre os dados apresentados pode-se visualizar o número de ocupantes da sala (4).

Os demais dados da Tabela 13 foram cadastrados para suas respectivas salas de modo análogo aos apresentados nas figuras apresentadas a seguir.

Figura 38: Schedule de horário de ocupação em salas de aulas e salas de professores



Fonte: Autor

Figura 39: Schedule de nível de atividade em salas de professores



Fonte: Autor

Figura 40: Cargas cadastradas para salas de professores, número de ocupantes, equipamentos elétricos, infiltração e iluminação e vazão de ar.

Sala de professores 1
(12 spaces and 1 thermal zones)

Definition	Value	Unit	Inst. Multiplier
Sala professores	4	people	1.0
Equipamentos sala de professores	5.4000	W/m ²	1.0
Iluminação sala de professores	8.0000	W/m ²	1.0
Inf. 6410 - 7	0.0003	m ³ /s /floor area m ²	
Vazão de ar - Escritórios (outdoor air method Sum)	0.0075	m ³ /s/person	

Fonte: Autor

5.3.3. ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Conhecendo a finalidade das salas e os equipamentos elétricos e eletrônicos instalado, é possível definir a potência que aquecimento gerada por estes equipamentos e pela iluminação de acordo com os valores estipulados por norma (ver Tabela 4 e Tabela 5).

A carga devido a iluminação e a carga originada pela dissipação de calor nos equipamentos em cada sala podem ser visualizadas na Tabela 14, os dados apresentados nesta foram devidamente associados como cargas para suas respectivas salas. O registro das cargas previstas para as salas de professores podem ser visualizadas já cadastradas no OpenStudio na Figura 40.

Tabela 14: potência dissipada por iluminação e por equipamentos elétricos por sala

Sala	Carga iluminação	Equipamentos instalados	Potência dissipada por equipamentos.	Potência dissipada total (equi.)
Sala de aula	16 W/m ²	1 Projetor 1 Computador 1 Monitor	60 W 55 W 55 W	170 W
Sala de professores	13 W/m ²	Escritório 15.5 m ² por posto de trabalho	---	5.4 W/m ²
Administração	8 W/m ²	Escritório > 15.5 m ²	---	5.4 W/m ²
Auditório	10 W/m ²	1 Projetor 2 Computadores 2 Monitores Amplificadores	60 W 110 W 110 W 40 W	320 W
Biblioteca	16 W/m ²	6 Computadores 6 Monitores 2 Impressoras de mesa	330 W 330 W 430 W	1090 W

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3.4. INFILTRAÇÃO

Considerando janelas comuns e portas sem vedação bem ajustadas, determina-se o fluxo de ar externo devido a infiltração por área de abertura, como apresentado na Tabela 15.

Tabela 15: Infiltração de ar por tipo de abertura

Tipo de abertura	Fluxo de ar externo
Janelas	3.0 (m ² / h / m ² de fresta)
Portas externas	12.0 (m ² / h / m ² de fresta)

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3.5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

A modelagem das estruturas foi feita em camadas, considerando qual o material, suas características físicas e sua espessura. As construções utilizadas e suas respectivas modelagens estão listadas na Tabela 16

Também é importante realizar a modelagem dos vidros das janelas, especificando seu coeficiente de refletividade e transmissividade. A tabela Tabela 17 apresenta os coeficientes utilizados, obtidos de acordo com (RIVERO, 1986).

Tabela 16: Características construtivas paredes e telhados

Construção	Estrutura das camadas	Condutividade do material (W/m.k)	Densidade do material (kg/m ³)	Espessura do material na camada (m)
Paredes Internas	Reboco	0.692	1858.0	0.025
	Tijolo 20 cm	2.381	1100.0	0.189
	Concreto pesado	1.730	2243.0	0.203
Telhados Internos	Reboco	0.692	1858.0	0.025
	Tijolo 20 cm	2.381	1100.0	0.189
	Concreto leve	0.530	1280.0	0.102
Paredes Externas	Insolação em parede	0.043	91.0	0.034
	Reboco	0.692	1858.0	0.025
	Tijolo 20 cm	2.381	1100.0	0.189
	Concreto pesado	1.730	2243.0	0.203
Telhado Externo	Insolação em telhado	0.049	265.0	0.169
	Reboco	0.692	1858.0	0.025
	Tijolo 20 cm	2.381	1100.0	0.189
	Concreto leve	0.530	1280.0	0.102
Partições	Chapa de MDF	0.120	500.0	0.10

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 17: Coeficientes do vidro claro

Tipo de vidro	Transmissividade	Absorvidade	Refletividade	Condutividade
Vidro claro (caso base)	0.85	0.07	0.08	0.90 W/m.k

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3.6. RENOVAÇÃO DE AR

É necessário dimensionar o fluxo de ar externo proporcionado pelo sistema de climatização, para isso considera-se o tipo de atividade de acordo com a Tabela 7. Neste projeto utilizou-se o nível 1 de ventilação, os fatores de vazão utilizados, bem como o número de pessoas, área das salas e fluxo de ar externo mínimo estão apresentados na Tabela 18. Nesta tabela também é representada uma coluna referente ao fluxo de ar definido na NR 9 (7,5 L/pessoa/hora), como os valores obtidos através do cálculo definido na NR 9 resultaram em fluxo de ar acima dos calculados de acordo com a NBR 16401, utilizaremos estes valores para a modelagem no software.

Tabela 18: Fator de vazão por pessoa e por área de acordo com a finalidade da sala

Sala	Ocupação	Área (m ²)	Fp	Fa	Fluxo resultante (L/s)	Fluxo resultante (m ³ /h)	Fluxo resultante (L/s) (NR 9)
Sala de aula 1	44 pessoas	55,00	5.0	0.6	253	70,28	330,00
Sala de aula 2 Sala de aula 3 Sala de aula 4 Sala de aula 5 Sala de aula 6 Sala de aula 7 Sala de aula 8 Sala de aula 10 Sala de aula 11	54 pessoas	76,00	5.0	0.6	315,6	87,67	405,00
Sala de aula 9	66 pessoas	94,00	5.0	0.6	386,4	107,33	495,00
Sala de prof. 1-2 Sala de prof. 3-4 Sala de prof. 5-6 Sala de prof. 7-8 Sala de prof. 9-10 Sala de prof. 11-12 Sala de prof. 13-14 Sala de prof. 18-19 Sala de prof. 20-21 Sala de prof. 22-23 Sala de prof. 24-25 Sala de prof. 26-27 Sala de prof. 28-29 Sala de prof. 30-31 Sala de prof. 32-33 Sala de prof. 34-35	4 pessoas	32,00	2.5	0.3	19,6	5,44	30,00
Sala de prof. 15-16-17	6 pessoas	48,00	2.5	0.3	29,4	8,17	45,00

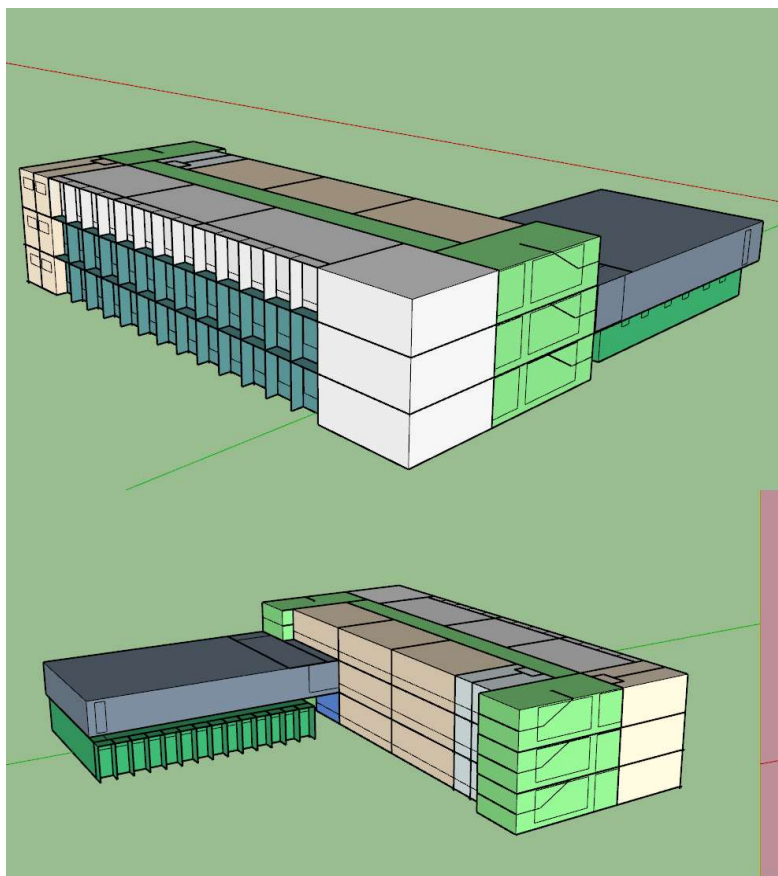
Administração	2 Pessoas	37,00	2.5	0.3	16,1	4,47	20,00
Auditório	333 pessoas	411,00	2.5	0.3	955,8	265,50	2497,50
Biblioteca	0.1 pessoa/ m ²	382,00	2.5	0.6	209,6	58,22	286,50

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4. DETERMINAÇÃO DE ZONAS TÉRMICAS

Pela similaridade a posição geográfica e das cargas internas das salas, é possível agrupá-las em uma zona térmica. No projeto utilizaram-se 9 zonas térmicas, onde as salas foram distribuídas conforme a Tabela 19. A localização das zonas térmicas podem ser visualizadas na modelagem do SkethUp apresentada na Figura 41.

Figura 41: Vista frontal e traseira- Anexo C - Indicação de zonas térmicas



Fonte: Autor

Tabela 19: Especificação de zonas térmicas

Zona térmica	Salas pertencentes a zona	Descrição
Administração	Administração	Sala administrativa localizada no pavimento térreo com fachada sul sem incidência solar.
Auditório	Auditório	Auditório localizado no segundo pavimento, com paredes externas leste, oeste e sul.
Biblioteca	Biblioteca	Localizada no pavimento térreo, com paredes externas leste, oeste e sul. Brises externos de 140 cm com espaçamento de 162.5 cm na face leste.
Sala de aula Sul	Sala de aula 2 Sala de aula 3 Sala de aula 4 Sala de aula 5 Sala de aula 6 Sala de aula 7 Sala de aula 8	Salas de aula do primeiro e terceiro pavimento com paredes externas voltadas para o sul.
Sala de aula Norte	Sala de aula 1 Sala de aula 9 Sala de aula 10 Sala de aula 11	Salas de aula com faces externas voltadas para o norte. Brises de 110 cm com espaçamento de 255 cm entre si.
Sala de professores Norte	Sala de prof. 1-2 Sala de prof. 3-4 Sala de prof. 5-6 Sala de prof. 7-8 Sala de prof. 9-10 Sala de prof. 15-16-17 Sala de prof. 18-19 Sala de prof. 20-21 Sala de prof. 22-23 Sala de prof. 24-25 Sala de prof. 26-27	Salas de professores contendo escritórios separados por divisórias. Paredes externas voltadas para o norte. Brises de 110 cm com espaçamento de 255 cm.
Sala de professores Sul	Sala de prof. 13-14 Sala de prof. 30-31 Sala de prof. 34-35	Salas de professores contendo dois escritórios separados por divisórias. Paredes externas voltadas para o norte.
Sala de professores Leste	Sala de prof. 11-12 Sala de prof. 38-29 Sala de prof. 32-33	Sala de professores com fachadas norte e leste.

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.5. SIMULAÇÃO DO CASO BASE

Com todos os dados necessários para a simulação inseridos no OpenStudio, foi realizada a simulação sem adição de um sistema de climatização. Com esta simulação é

possível verificar a temperatura interna em cada uma das zonas térmicas ao longo do ano, como apresentado na Figura 42.

Nesta imagem, o número em cada seção da tabela representa o número de horas que a zona térmica permaneceu dentro da faixa de temperatura indicada. É possível visualizar que as salas na face norte passam um tempo considerável em temperaturas acima de 26° C enquanto as salas da face sul, além de também sofrerem com temperatura acima de 26° C, passam um tempo considerável em baixas temperaturas (abaixo de 19° C).

Figura 42: Temperatura interna das salas obtida na simulação sem sistema de climatização
Zone Conditions

Temperature (Table values represent hours spent in each temperature range)

Zone	Unmet Htg (hr)	Unmet Htg - Occ (hr)	< 13 (C)	13-16 (C)	16-19 (C)	19-20 (C)	20-21 (C)	21-22 (C)	22-23 (C)	23-24 (C)	24-26 (C)	26-28 (C)	28-31 (C)	>= 31 (C)	Unmet Cig (hr)	Unmet Cig - Occ (hr)	Mean Temp (C)
ADMINISTRAÇÃO	0	0	0	154	1169	558	725	703	781	870	1646	1194	862	98	0	0	23.2 (C)
AUDITÓRIO	0	0	0	605	2318	903	967	1017	1065	810	750	204	112	9	0	0	20.5 (C)
BIBLIOTECA	0	0	0	203	1387	670	740	834	811	845	1358	889	827	196	0	0	22.9 (C)
SALA DE AULA - NORTE	0	0	0	9	380	247	372	448	472	530	1281	1459	1888	1674	0	0	26.7 (C)
SALA DE AULA - SUL	0	0	2	89	722	382	404	502	490	486	1320	1490	1723	1150	0	0	25.6 (C)
SALA DE PROFESSOR - LESTE	0	0	0	0	366	388	675	760	874	777	1872	1846	1118	84	0	0	24.4 (C)
SALA DE PROFESSOR - NORTE	0	0	0	0	94	216	406	687	825	941	2149	2072	1257	113	0	0	25.1 (C)
SALA DE PROFESSOR - SUL	0	0	0	157	1016	537	549	670	645	604	1194	1282	1590	516	0	0	24.3 (C)

Fonte: Autor

5.6. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

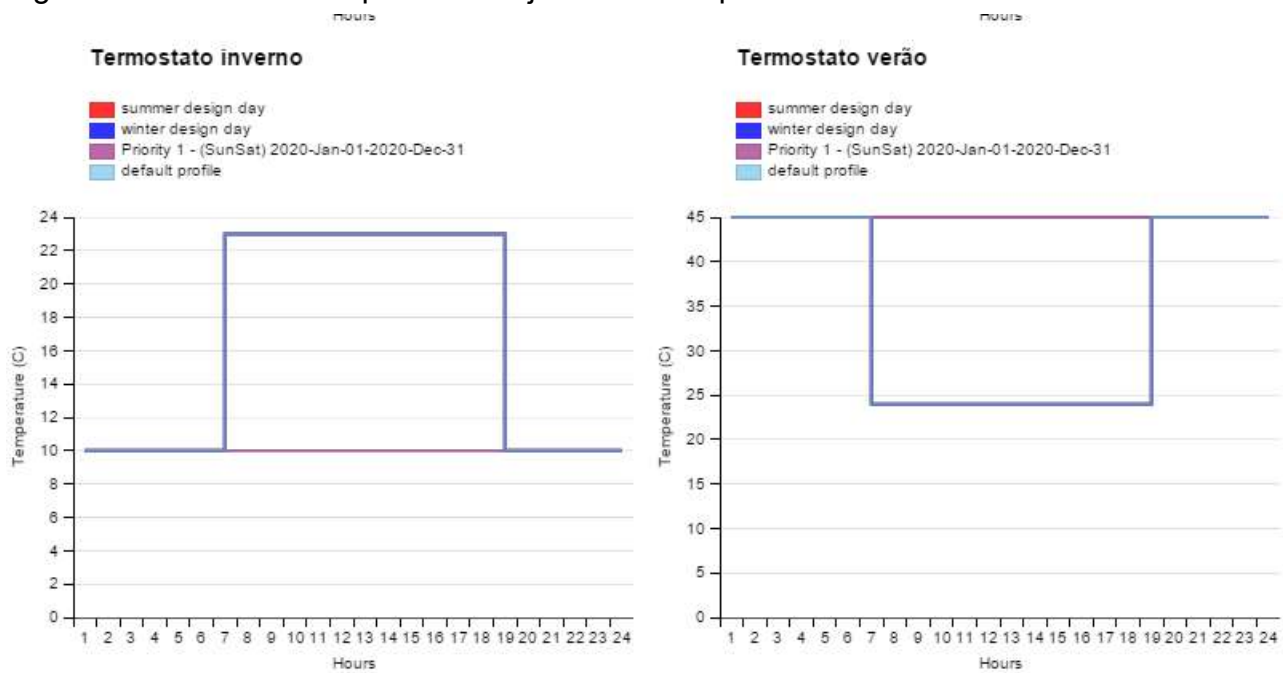
Com o cenário sem climatização já modelado, cria-se um sistema HVAC para determinar a potência de aquecimento e refrigeração necessária para climatizar as zonas térmicas avaliadas. Para isso, é necessário criar os cronogramas de ponto de ajuste de temperatura dos termostatos tanto para aquecimento quanto para refrigeração.

Para os termostatos, optou-se (utilizando os dados da Tabela 10) definir os pontos de ajustes de temperatura como sendo 23 °C durante o inverno e 24 °C durante o verão. Tais temperaturas foram definidas durante o horário de ocupação das salas (iniciando as 7:00 e encerrando as 19:30, de acordo com os horários extremos de funcionamento apresentados na Tabela 13), para os demais horários foram definidas temperaturas acima da temperatura

de aquecimento (por padrão 40 °C, para o termostato de inverno) e abaixo da temperatura de refrigeração (por padrão 14 °C, para o termostato de verão), deste modo o sistema não identificara necessidade de operação fora do horário de ocupação. Os schedules definidos podem ser visualizados na Figura 43.

Nesta simulação, optou-se por dividir a edificação avaliada em 3 setores, sendo cada um deles suprido por uma única unidade condensadora, são eles: "Auditório", "Biblioteca" e "Salas de Aula e de Professores". Essa divisão foi realizada devido ao diferente horário de funcionamento de cada uma destas zonas, evitando também o uso de apenas uma unidade condensadora de potência elevada, que ocasiona um maior custo de aquisição e dificuldades de manutenção, já que nesta situação todo o sistema seria desligado em casos de reformas ou limpeza.

Figura 43: Schedules de pontos de ajuste das temperaturas dos termostatos



Fonte: Autor

Com isso, simulou-se novamente e obteve-se a potência térmica máxima e horaria requerida para a climatização da edificação, conforme apresentado na primeira coluna (Caso base) da Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28.

Podemos verificar na Figura 44 que as zonas térmicas permanecem durante grande parte do tempo na faixa estipulada de temperatura (entre 23°C e 24°C), note que durante o

período entre as 19:30 e as 7:00 o sistema de climatização não opera, justificando assim o período com temperatura abaixo da faixa prevista.

Figura 44: Temperatura interna das salas obtida na simulação com sistema de climatização
Zone Conditions

Temperature (Table values represent hours spent in each temperature range)

Zone	Unmet Htg (hr)	Unmet Htg - Occ (hr)	< 13 (C)	13-16 (C)	16-19 (C)	19-20 (C)	20-21 (C)	21-22 (C)	22-23 (C)	23-24 (C)	24-26 (C)	26-28 (C)	28-31 (C)	>= 31 (C)	Unmet Cig (hr)	Unmet Cig - Occ (hr)	Mean Temp (C)
ADMINISTRAÇÃO	723	17	0	100	1157	515	593	559	875	2357	2410	177	7	0	412	1	22.3 (C)
AUDITÓRIO	924	0	0	131	1512	674	748	784	1404	3105	371	31	0	0	156	0	21.4 (C)
BIBLIOTECA	830	0	0	133	1374	696	709	684	1112	2455	1499	120	18	0	335	0	21.8 (C)
SALA DE AULA - NORTE	377	0	0	17	520	354	450	511	655	3213	1804	818	321	97	779	12	23.5 (C)
SALA DE AULA - SUL	596	0	2	101	881	414	476	522	660	3375	1493	668	165	3	585	3	22.8 (C)
SALA DE PROFESSOR - LESTE	585	12	0	0	223	415	643	765	977	2591	2816	325	5	0	540	1	23.1 (C)
SALA DE PROFESSOR - NORTE	466	7	0	0	55	277	538	779	1178	2700	2919	278	36	0	586	1	23.3 (C)
SALA DE PROFESSOR - SUL	607	14	0	43	792	463	482	577	767	2242	2533	703	158	0	582	2	23.0 (C)

Fonte: Autor

Os valores presentes na Tabela 20 indicam a carga térmica máxima incidente sobre cada uma dos três setores avaliados (Auditório, Biblioteca, e Salas de Aula e de Professores), respectivamente. Verifica-se que os valores obtidos aqui são diferentes do somatório dos dados apresentados na Tabela 26 para cada um dos setores, isto ocorre por que o pico de carga de cada uma das zonas térmicas não coincidem. Estes dados serão utilizados para o dimensionamento das unidades condensadoras, indicando a potência mínima de refrigeração que o equipamento deve suprir.

Tabela 20: Pico de demanda térmica por setor avaliado (Caso base)

Setor avaliado	Pico de demanda de Arrefecimento (W)	Pico de demanda de Arrefecimento (BTU/h)	Pico de demanda de Aquecimento (W)	Pico de demanda de Aquecimento (BTU/h)
Auditório	26624	90789	31646	107912
Biblioteca	17269	58888	22174	75612
Demais salas	122552	417903	97497	332465

Fonte: Elaborado pelo Autor

Nesta mesma simulação, analisou-se algumas salas separadamente, com o intuito de definir qual a potência de climatização necessária para os equipamentos internos de tais salas. Os dados de demanda térmica máxima podem ser visualizados na Tabela 21.

Tabela 21: Potência térmica demandada para climatização de determinadas salas (Caso base)

Tipo de sala	Potência de Arrefecimento (W)	Potência de Arrefecimento (BTU/h)	Potência de Aquecimento (W)	Potência de Aquecimento (BTU/h)
Administração	1838	6267	3107	10595
Auditório	26624	90789	31646	107912
Biblioteca	17269	58888	22174	75612
Sala de aula 1	5900	20118	1297	4424
Sala de aula 7	7079	24139	2922	9964
Sala de aula 9	11378	38799	5860	19981
Sala de aula 10	9236	31494	4347	14822
Sala de professores 22 - 23	3172	10817	2919	9953
Sala de professores 30 - 31	2627	8959	3016	10286
Sala de professores 28 - 29	2980	10160	4068	13871

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após a modelagem do prédio, é possível realizar modificações físicas na infraestrutura do modelo de modo a reduzir a potência demandada para a climatização.

Como mencionado anteriormente, três cenários serão avaliados na análise de sensibilidade, sendo eles:

- a) Substituição dos vidros de janelas por vidros absorventes escuros;
- b) Substituição dos vidros de janelas por vidros refletivos escuros;

c) redução do pé-direito de 360 cm para 260 cm.

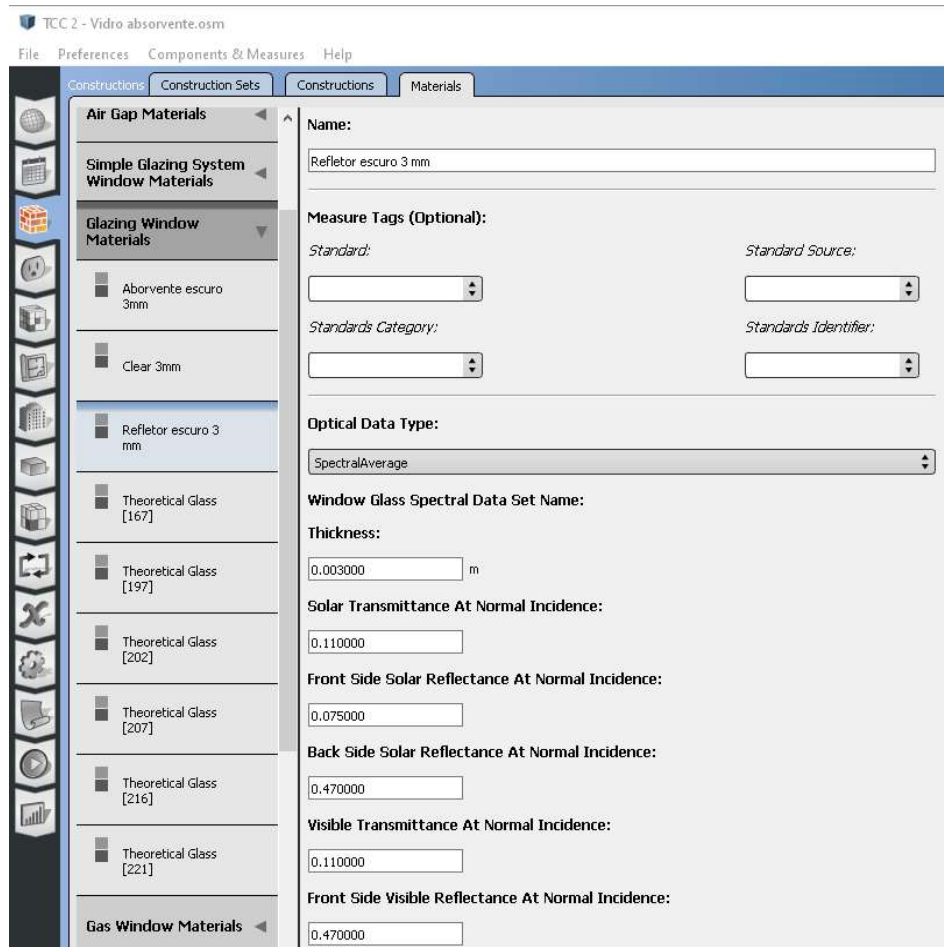
Para as situações de substituições dos vidros, foram utilizados os coeficientes de transmissividade, absorvidade, refletividade e condutividade de acordo com (RIVERO, 1986), conforme Tabela 22. Para realizar tal modificação, basta acessar a aba “Constructions”, na sub-aba “Materials” e cadastrar um novo material (Glazing Window Material) com as características desejadas (conforme apresentado na Figura 45), e em seguida acessar a sub-aba “Construction Sets” e arrastar o material criado da biblioteca até o local indicado (Figura 46).

Tabela 22: Coeficientes de interesse para os vidros refletor e absorvente

Tipo de vidro	Transmissividade	Absorvidade	Refletividade	Condutividade
Vidro refletor escuro	0.11	0.42	0.47	0.90 W/m.k
Vidro absorvente escuro	0.09	0.85	0.06	0.90 W/m.k

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 45: Cadastro dos vidros utilizados na análise de sensibilidade

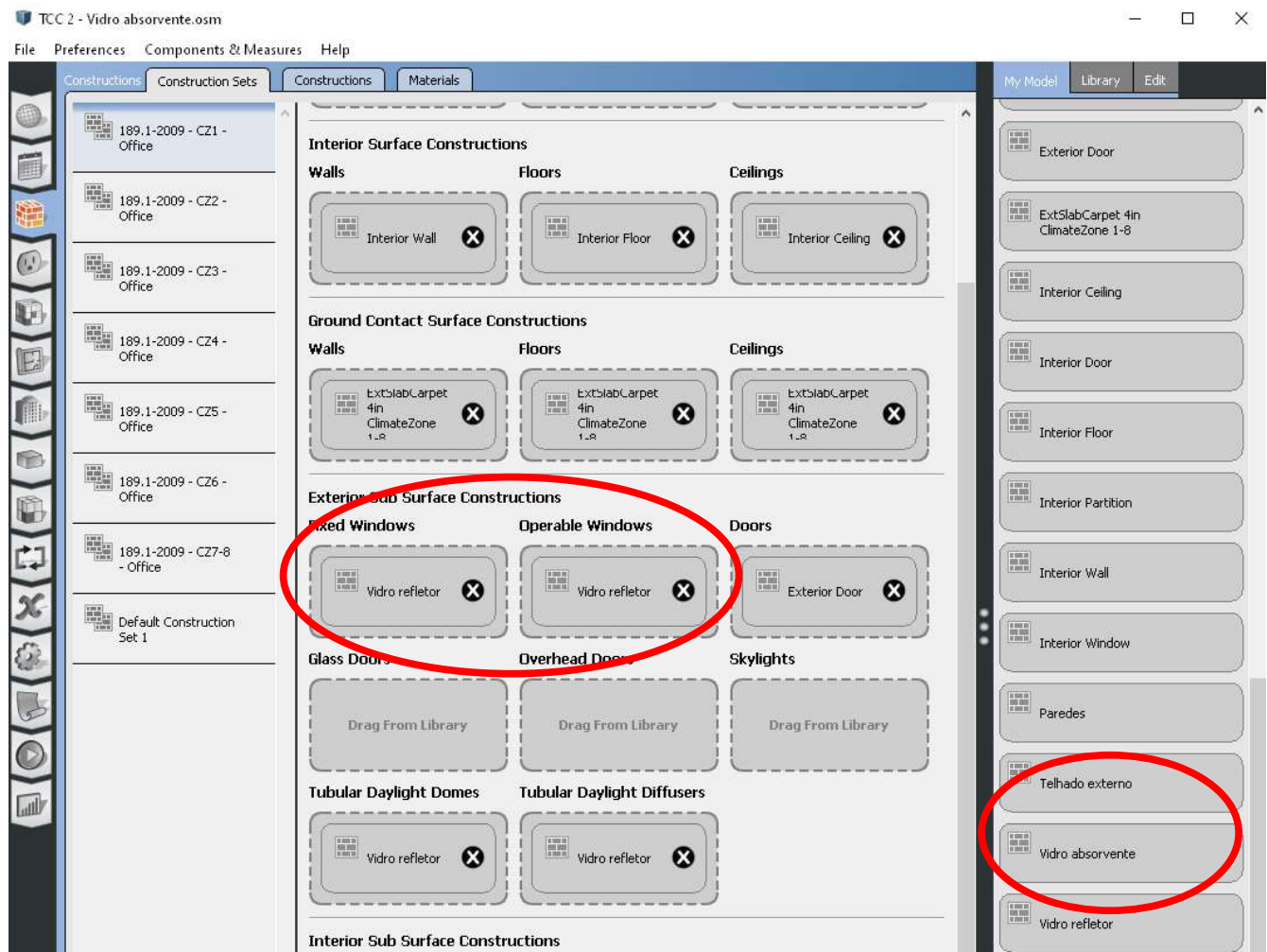


Fonte: Autor

Para a redução do pé-direito, reduziu-se em um metro a altura de cada um dos pavimentos no modelo 3D do SketchUp, além disso modificou-se a composição dos telhados de cada pavimento e do telhado externo.

Na aba "Constructions", sub-aba "Constructions", modificou-se os itens "Interior Ceiling" e "Telhado externo" conforme Tabela 23.

Figura 46: Substituição do tipo de vidro utilizado na edificação



Fonte: Autor

Tabela 23: Características construtivas de telhados após o rebaixamento

Construção	Estrutura das camadas	Condutividade do material (W/m.k)	Densidade do material (kg/m ³)	Espessura do material na camada (m)
Telhados Internos	Reboco	0.692	1858.0	0.025
	Concreto leve	0.530	1280.0	0.102
	Espaço de ar	0.180	1.27	0.980
	Forro de gesso	0.350	750.0	0.020
Telhado Externo	Insolação em telhado	0.049	265.0	0.169
	Reboco	0.692	1858.0	0.025
	Concreto leve	0.530	1280.0	0.102
	Espaço de ar	0.180	1.27	0.980
	Forro de gesso	0.350	750.0	0.020

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores de carga térmica máxima incidente e carga térmica horária em cada zona térmica podem ser visualizados na Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28.

Como será discutido posteriormente, os resultados obtidos com a substituição dos vidros não se mostrou satisfatório, de modo que a análise econômica só sera realizada com o cenário de redução do pé-direito da edificação.

Assim, do mesmo modo como realizado com o “caso base”, a Tabela 24 indica o valor do pico de carga térmica utilizada para a climatização dos três setores avaliados (auditório, biblioteca e demais salas) e a Tabela 25 indica a demanda máxima para determinadas salas, que serão utilizadas de referência para análises futuras.

Tabela 24: Pico de demanda térmica por setor avaliado (com a redução do pé-direito)

Setor avaliado	Pico de demanda de Arrefecimento (W)	Pico de demanda de Arrefecimento (BTU/h)	Pico de demanda de Aquecimento (W)	Pico de demanda de Aquecimento (BTU/h)
Auditório	27071,54	92314	9290,24	31680
Biblioteca	14549,6	49614	23923,67	81580
Demais salas	71637	244281	27430	93537

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 25: Potência térmica demandada para climatização de determinadas salas (com a redução do pé-direito)

Tipo de sala	Potência de Arrefecimento (W)	Potência de Arrefecimento (BTU/h)	Potência de Aquecimento (W)	Potência de Aquecimento (BTU/h)
Administração	1417,34	4833	2213,22	7547
Auditório	27071,54	92314	9290,24	31680
Biblioteca	14549,6	49614	23923,67	81580
Sala de aula 1	2623,51	8946	4015,27	13692
Sala de aula 7	6159,01	21002	1946,15	6636
Sala de aula 9	11021,24	37582	2593,93	8845
Sala de aula 10	9121,06	31103	1949,61	6648
Sala de professores 22-23	2304,56	7859	1854,21	6323
Sala de professores 30-31	1550,62	5288	2930,06	9992
Sala de professores 28-29	2563,36	8741	3462,07	11806

Fonte: Elaborado pelo Autor

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS

Dentre os resultados das simulações obtemos o valor de potência máxima demandada para arrefecimento/aquecimento da cada zona térmica (Tabela 26) e a carga térmica fornecida pelo sistema HVAC calculado (Tabela 27 e Tabela 28).

Na Figura 47 e Figura 48 podem ser visualizadas as curvas geradas com os valores da Tabela 27, analisando esta curva e os valores tabelados percebe-se que o uso de vidros absorventes e vidros refletores reduzem a demanda energética para o sistema de refrigeração, contudo tais modificações aumentam o consumo do sistema de aquecimento.

Esse fenômeno ocorre pois estes vidros são utilizados para a redução da carga térmica incidente em um ambiente por radiação solar, seja refletindo (vidro refletor) ou absorvendo (vidro absorvente) parte desta energia. Reduzindo esta energia, a temperatura interna dos ambientes tende a reduzir, facilitando o processo de refrigeração porém demandando maior energia para o aquecimento.

Percebe-se na Tabela 26 que o caso base ainda requer uma maior potência de pico para refrigeração em relação a substituição dos vidros, mesmo que seu consumo anual seja menor. Isto acontece pois a característica absorvente dos vidros também ocorrem no sentido inverso (de dentro para fora das salas), o que ocasiona uma dificuldade maior na redução de temperatura das salas em determinadas situações. Mesmo assim a ocorrência deste fenômeno não é recorrente a ponto de fazer o consumo de energia para refrigeração ao longo de um ano ser superior a situação de substituição dos vidros.

Já na situação de redução do pé direito das salas temos uma redução no consumo energético em ambas as estações. Os resultados das simulações indicam uma redução de consumo (de carga térmica) de 16,45 MWh/ano, equivalente a 7,86% da demanda do caso base.

Tabela 26: Potência térmica máxima requerida para climatização por zona térmica

Zona Térmica	Potência de arrefecimento (W)				Potência de aquecimento (W)			
	Caso base	Vidro Absorvente	Vidro Refletor	Teto Rebaixado	Caso base	Vidro Absorvente	Vidro Refletor	Teto Rebaixado
Administração	2124	1937	1935	1474	3745	3014	3028	2073
Auditório	26420	26596	26547	26789	32854	31512	31537	8420
Biblioteca	13657	17547	17130	14503	25245	22029	22117	23879
Sala de aula Norte	32923	28915	28868	30059	17443	13586	13676	8931
Sala de aula Sul	49549	47449	47475	39022	29600	24171	24395	12626
Sala de professor Leste	8106	7694	7691	6631	13546	12477	12463	10578
Sala de professor Norte	37405	32315	32118	21556	41516	32401	32530	22258
Sala de professor Sul	9007	7342	7378	4850	14280	11360	11411	9747
Total (kW):	179192	169795	169143	144883	178230	150550	151157	98511

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 27: Consumo mensal de energia estimado para refrigeração e para aquecimento

Mês	Carga de arrefecimento (kWh)				Carga de aquecimento (kWh)			
	Caso base	Vidro Absorvente	Vidro Refletor	Teto Rebaixado	Caso base	Vidro Absorvente	Vidro Refletor	Teto Rebaixado
Jan	18362	17449	17473	16418	3476	4223	4193	3975
Fev	15478	14785	14799	14081	3417	4133	4105	3986
Mar	12109	11853	11852	12690	4789	5601	5565	5386
Abr	8699	8392	8391	7399	7227	8035	7992	6412
Mai	6308	6166	6156	6338	10133	10839	10793	9575
Jun	3298	3196	3190	4045	14333	14401	14373	11425
Jul	2615	2554	2546	3028	18481	18535	18510	12865
Ago	5183	4960	4955	4739	10401	11184	11134	10326
Set	6006	5842	5835	4752	8867	9956	9906	8377
Out	9989	9730	9727	7892	6974	8138	8088	7212
Nov	10033	9656	9660	10471	4279	5042	5011	4984
Dez	15053	14262	14273	12649	3845	4651	4618	3885
Total	113134	108842	108856	104502	96221	104739	104287	88407

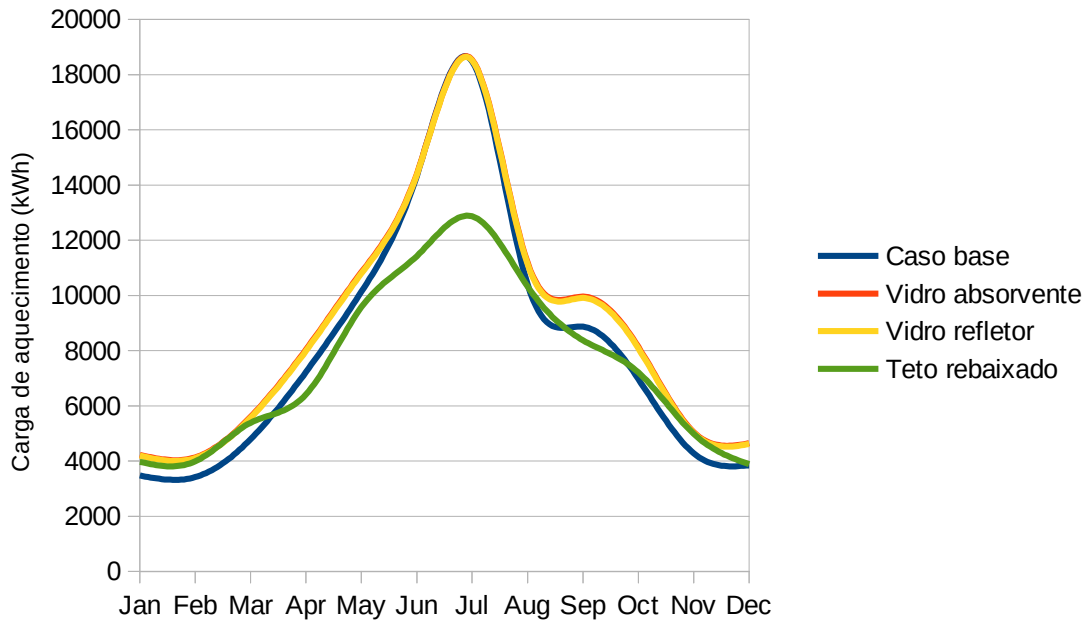
Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 28: Carga térmica mensal total (aquecimento e refrigeração) por cenário avaliado

Mês	Caso base (kWh)	Vidro Absorvente (kWh)	Vidro Refletor (kWh)	Teto Rebaixado (kWh)
Jan	21838	21672	21666	20393
Fev	18895	18918	18904	18067
Mar	16898	17454	17417	18077
Abr	15927	16427	16383	13811
Mai	16441	17005	16948	15913
Jun	17631	17597	17563	15470
Jul	21096	21088	21056	15892
Ago	15585	16144	16089	15065
Set	14873	15798	15741	13128
Out	16963	17868	17815	15104
Nov	14312	14699	14670	15455
Dez	18898	18912	18891	16534
Total Anual	209355	213581	213143	192910

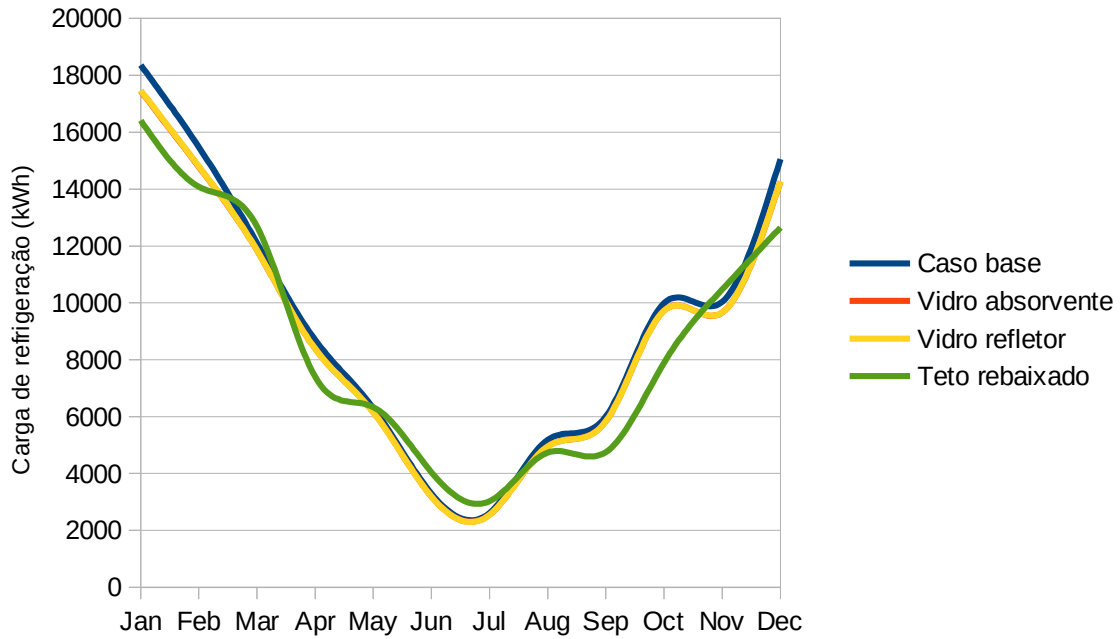
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 47: Gráfico de carga térmica de aquecimento requerida para climatização das zonas térmicas por cenário avaliado



Fonte: Autor

Figura 48: Gráfico de carga térmica de refrigeração requerida para climatização das zonas térmicas por cenário avaliado



Fonte: Autor

6.2. ADEQUAÇÃO DO SISTEMA ATUAL

Ao invés de instalar um sistema de climatização com vazão de ar variável, é possível adequar o sistema já existente através da adição de equipamentos de tal maneira que a demanda de refrigeração/aquecimento e os parâmetros de renovação de ar sejam satisfeitos.

A potência dos equipamentos das salas serão determinadas através da extrapolação dos dados obtidos no levantamento dos equipamentos atualmente instalados para as salas de aulas, biblioteca e auditório, conforme apresentado no Anexo A. Para as salas de professores, devido aos equipamentos em cada sala divergirem quanto a potência de refrigeração e número de evaporadoras, será considerado que os equipamentos utilizados em cada uma das salas são um split de capacidade 12.000 BTU/h.

A carga ideal de refrigeração a ser considerada em cada sala será definida através da extrapolação dos resultados apresentados na Tabela 21 para as salas pertencentes a mesma zona térmica.

Ambas as extrapolações ocorrerão agrupando as salas similares, sendo que as salas 1110 (Sala 1) e 1305 (Sala 9) são singulares, para as demais salas com face externa norte serão considerados os dados da sala 1304 (Sala 10) e as salas de aula com face externa sul serão ditas idênticas a sala 1205 (Sala 5). Essa relação pode ser melhor visualizada na Tabela 29

Tabela 29: Extrapolação dos resultados de simulação individual das salas de aula para as demais salas de aula da edificação

Sala de aula	Sala referencia (equipamentos Instalados)	Sala referencia (Carga térmica)	Equipamentos instalados
Sala de aula 1	1110	1110	1 evaporadora split do tipo Hi-wall 18.000 BTU/h com condensadora individual
Sala de aula 2 Sala de aula 3 Sala de aula 4 Sala de aula 5 Sala de aula 6 Sala de aula 7 Sala de aula 8	1205	1205	2 evaporadoras split do tipo Hi-wall 18.000 BTU/h com uma condensadora individual cada
Sala de aula 9	1305	1305	2 evaporadoras split do tipo Hi-wall 18.000 BTU/h com uma condensadora individual cada
Sala de aula 10 Sala de aula 11	1304	1304	2 evaporadoras split do tipo Hi-wall 18.000 BTU/h com uma condensadora individual cada
Auditório	Auditório	Auditório	9 evaporadoras split do tipo cassete 48.000 BTU/h com uma condensadora individual cada
Biblioteca	Biblioteca	Biblioteca	4 evaporadoras split do tipo cassete 48.000 BTU/h com uma condensadora individual cada
Sala de prof. 1-2 Sala de prof. 3-4 Sala de prof. 5-6 Sala de prof. 7-8 Sala de prof. 9-10 Sala de prof. 18-19 Sala de prof. 20-21 Sala de prof. 22-23 Sala de prof. 24-25 Sala de prof. 26-27	--	Sala de prof. 20-21	1 evaporadora do tipo Hi-wall 12.000 BTU/h com uma condensadora individual
Sala de prof. 13-14 Sala de prof. 30-31 Sala de prof. 34-35	--	Sala de prof. 30-31	1 evaporadora do tipo Hi-wall 12.000 BTU/h com uma condensadora individual
Sala de prof. 11-12 Sala de prof. 28-29 Sala de prof. 32-33	--	Sala de prof. 28-29	1 evaporadora do tipo Hi-wall 12.000 BTU/h com uma condensadora individual

Fonte: Elaborado pelo Autor

Comparando a potência dos equipamentos atualmente instalados nas salas de aula com a potência ideal para estes ambientes, é possível determinar soluções para correção de tais valores. A comparação entre as potências e a solução adotada podem ser visualizadas na Tabela 30.

Vale destacar que nas soluções apresentadas na Tabela 30 optou-se por utilizar mais de uma evaporadora por sala para garantir uma uniformidade no gradiente de temperatura conforme estipulado por norma (NBR16401-3, 2008). O consumo energético anual dos equipamentos foi obtido através do valor de consumo energético anual tabelado pelo INMETRO (INMETRO, 2021) considerando a marca ELGIN (marca comumente encontrada no edifício avaliado). Os valores apresentados na tabela do INMETRO são referentes ao consumo anual com o uso de uma hora diária dos equipamentos. Para adequar a situação avaliada considerou-se um tempo de operação diários de cada sala conforme apresentado na Tabela 13. A adequação do consumo foi realizada conforme equação a seguir:

$$C = C_{Procel} \cdot T_n \cdot \frac{5}{7}$$

Onde:

C = Consumo energético anual a ser considerado;

$C_{inmetro}$ = Consumo energético mensal para uso de uma hora por dia de acordo com o INMETRO (INMETRO, 2021);

T_n = Tempo de ocupação diário da sala avaliada (conforme Tabela 13)

Tabela 30: Relação entre potência real e ideal de climatização para as salas de aula do edifício avaliado e opções para adequação

Sala	Potência instalada (BTU/h)	Potência de refrigeração ideal (BTU/h)	Solução adotada	Consumo energético anual estimado por sala	
				Atual (MWh/ano)	Aplicando as soluções (MWh/ano)
Sala de aula 1	18000	20118	Substituição por 2 unidades de 12000 BTU/h	4,73	5,89
Sala de aula 2 Sala de aula 3 Sala de aula 4 Sala de aula 5 Sala de aula 6 Sala de aula 7 Sala de aula 8	36000	24139	Substituição por 2 unidades de 12000 BTU/h	9,46	5,89
Sala de aula 9	36000	38799	Substituição por 4 unidades de 12000 BTU/h	9,46	11,78
Sala de aula 10 Sala de aula 11	36000	31494	---	9,46	9,46
Auditório	432000	107912	Substituição por 6 splits de 18000 BTU/h	6,96	2,99
Biblioteca	192000	75612	Substituição por 5 splits de 18000 BTU/h	35,55	28,63
Sala de prof. 1-2 Sala de prof. 3-4 Sala de prof. 5-6 Sala de prof. 7-8 Sala de prof. 9-10 Sala de prof. 18-19 Sala de prof. 20-21 Sala de prof. 22-23 Sala de prof. 24-25 Sala de prof. 26-27	12000	10817	--	2,17	2,17
Sala de prof. 13-14 Sala de prof. 30-31 Sala de prof. 34-35 Administração	12000	10286	--	2,17	2,17
Sala de prof. 11-12 Sala de prof. 28-29 Sala de prof. 32-33	12000	13871	Substituição por 2 unidades de 9000 BTU/h	2,17	3,38

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para as dimensões dos equipamentos insufladores de ar, devem ser utilizados os resultados obtidos na Tabela 18 para a vazão de ar e os dados da Tabela 9 para a determinação do filtro.

6.3. DETERMINAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

A escolha das máquinas split utilizadas no cenário de adequação do sistema atual pode ser visualizado na Tabela 30.

As evaporadoras do sistema VRV projetado para o cenário atual e para a situação de rebaixamento do pé-direito das salas serão escolhidas de acordo com os resultados de potência máxima de refrigeração demandada para cada sala, conforme Tabela 21 e Tabela 25, realizando a extrapolação apresentada na Tabela 30 para expandir os valores obtidos para as demais salas.

Neste trabalho, serão consideradas três conjuntos de evaporadoras para alimentação de três zonas distintas, auditório, biblioteca e demais salas (salas de aula, sala de professores e administração), a potência destes equipamentos será considerada de acordo com resultados obtidos nas simulações e registrado na Tabela 20 (para o caso base) e Tabela 24 (para o cenário com redução do pé-direito).

As características dos equipamentos utilizados nos sistemas de fluxo de refrigeração variável, a potência elétrica e o consumo anual estimado podem ser visualizados na Tabela 31 a seguir:

Tabela 31: Características dos sistemas VRV's projetados

Sala de aula	Caso base			Teto rebaixado		
	Equip. instalados	Potência elétrica instalada (kW)	Consumo anual estimado (MWh)	Equip. instalados	Potência elétrica instalada (kW)	Consumo anual estimado (MWh)
Sala de aula 1	2 x Evap. 12000 BTU/h	0,12	0,29	2 x Evap. 9000 BTU/h	0,11	0,28
Sala de aula 2 Sala de aula 3 Sala de aula 4 Sala de aula 5 Sala de aula 6 Sala de aula 7 Sala de aula 8	2 x Evap. 12000 BTU/h	0,12	0,29	2 x Evap. 12000 BTU/h	0,12	0,29
Sala de aula 9	2 x Evap. 12000 BTU/h	0,24	0,58	2 x Evap. 18000 BTU/h	0,18	0,44
Sala de aula 10 Sala de aula 11	4 x Evap. 18000 BTU/h	0,18	0,44	2 x Evap. 18000 BTU/h	0,18	0,44
Auditório	6 x Evap. 18000 BTU/h	0,61	0,16	8 x Evap. 12000 BTU/h	0,47	0,12
Biblioteca	5 x Evap. 18000 BTU/h	0,51	1,51	7 x Evap. 12000 BTU/h	0,41	1,23
Sala de prof. 1-2 Sala de prof. 3-4 Sala de prof. 5-6 Sala de prof. 7-8 Sala de prof. 9-10 Sala de prof. 18-19 Sala de prof. 20-21 Sala de prof. 22-23 Sala de prof. 24-25 Sala de prof. 26-27	1 x Evap. 12000 BTU/h	0,11	0,21	1 x Evap. 9000 BTU/h	0,06	0,10
Sala de prof. 13-14 Sala de prof. 30-31 Sala de prof. 34-35 Administração	1 x Evap. 12000 BTU/h	0,06	0,11	1 x Evap. 12000 BTU/h	0,06	0,11
Sala de prof. 11-12 Sala de prof. 28-29 Sala de prof. 32-33	2 x Evap. 9000 BTU/h	0,06	0,11	1 x Evap. 12000 BTU/h	0,06	0,10
Condensadora Auditório	1 x Cond. 120000 BTU/h	9,3	2,42	1 x Cond. 100000 BTU/h	6,85	1,78
Condensadora Biblioteca	1 x Cond. 80000 BTU/h	5,1	15,25	1 x Cond. 100000 BTU/h	6,85	20,48
Condensadora Demais salas	2 x Cond. 220000 BTU/h	34,7	85,71	1 x Cond. 260000 BTU/h	18,91	46,71

Fonte: Elaborado pelo Autor

A lista dos equipamentos a serem utilizados em cada um dos 3 cenários avaliados (sistema VRV, sistema VRV com redução do pé-direito das salas e adequação do sistema split) e o custo de aquisição e instalação estipulado através de pesquisas em catálogo de fornecedores pode ser visualizado na Tabela 32.

Tabela 32: Equipamentos instalados e investimento inicial necessário em cada cenário avaliado

Equipamento	Potência elétrica (W)	Preço de aquisição	Quantidade de equipamentos utilizados			
			Sistema atual	Sistema VRV	Sistema VRV + Red. pé-direito	Adequação do sistema split
Split Hiwall, 9000 BTU/h	648	R\$ 1.500,00				6
Split Hiwall, 12000 BTU/h	902	R\$ 1.650,00	17			34
Split Hiwall, 18000 BTU/h	1380	R\$ 2.600,00	21			15
Split Cassete 48000 BTU/h	4315	R\$ 14.000,00	13			
Evaporadora VRV, Hiwall, 9000 BTU/h	57	R\$ 2.500,00			13	
Evaporadora VRV, Hiwall, 12000 BTU/h	59	R\$ 2.900,00		34	35	
Evaporadora VRV, Hiwall, 18000 BTU/h	101	R\$ 3.700,00		15	6	
Condensadora VRV, 80000 BTU/h	5100	R\$ 24.050,00		1		
Condensadora VRV, 100000 BTU/h	6850	R\$ 30.640,00			2	
Condensadora VRV, 120000 BTU/h	9300	R\$ 34.680,00		1		
Condensadora VRV, 220000 BTU/h	17350	R\$ 56.150,00		2		
Condensadora VRV, 260000 BTU/h	18910	R\$ 60.810,00			1	
Investimento inicial por cenário (R\$):			R\$ 264.650,00	R\$ 325.130,00	R\$ 278.290,00	R\$ 104.100,00

Fonte: Elaborado pelo Autor

No cenário de redução da altura das salas deve ser levado em consideração o investimento com a aquisição e a mão de obra para a colocação do forro de gesso. Para um preço estimado (mão-de-obra + material) de R\$ 100,00 por metro quadrado, o custo desta

reforma seria de R\$ 234.300,00. Assim o investimento inicial total para o segundo cenário é de R\$ 512.590,00.

Para simplificação da análise, não foram considerados os custos de mão de obra e aquisição da tubulação do sistema VRV nem o custo dos insufladores de ar necessário para o sistema split.

6.4. COMPARAÇÃO ECONÔMICA

Para verificar a factibilidade das alterações propostas em relação aos custos de aquisição e retorno financeiro, é importante que seja efetuado um estudo de viabilidade econômica.

Este estudo deve levar em consideração o investimento inicial necessário para a aquisição dos equipamentos, a economia de gastos com consumo de energia elétrica e o tempo de retorno estimado.

Para a análise proposta, serão verificados os gastos anuais médios em cada cenário, sendo adotada uma tarifa de energia como 460,00 R\$/MWh. A taxa de atratividade a ser utilizada será a taxa fixa de financiamento do BNDS (TFB), 11,65% a.a (valores de 15 de agosto de 2022).

Para o cálculo do Valor Anual Equivalente, será considerada uma vida útil de 15 anos para equipamentos de climatização. Destaca-se que na avaliação do cenário atual considerou-se um custo de aquisição de equipamentos pois os equipamentos existentes estão em diferentes estágios de sua vida útil, e todos os splits devem ser substituídos em até 15 anos (final da vida útil). Para representar essa situação, considerou-se que todos os equipamentos do cenário atual serão trocados em 7 anos (aproximadamente metade da vida útil das máquinas).

A Tabela 33 apresenta a estimativa de consumo anual. O custo total anual de cada um dos cenários e a economia resultante quando comparada a situação atual podem ser verificados na Tabela 34.

O resultado da análise econômica indica uma redução no consumo de energia elétrica em todos os cenários propostos. A solução utilizando um sistema VRV sem mudanças de infraestrutura das salas apresentou um aumento no VAE em relação ao caso base, ou seja, a

solução ocasionará maiores gastos econômicos que o cenário atual, contudo as demais soluções resultaram em uma economia anual de R\$ 13.650,84 (sistema VRV com redução do pé direito) e R\$ 4.733,64 (substituição do sistema split).

Tabela 33: Comparação entre carga instalada (kW) e consumo anual (kWh/ano) em cada cenário

Situação	Carga instalada (kW)	Consumo anual (kWh/ano)	Custo anual (R\$/ano)
Caso base (atual)	100,46	178,72	R\$ 82.211,76
Solução VRV	52,92	110,96	R\$ 51.043,07
Solução VRV + Redução do pé-direito	35,95	75,75	R\$ 34.846,84
Adequação dos splits	55,26	149,95	R\$ 68.978,15

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 34: Análise econômica das soluções propostas

Situação	Custo de aquisição	Custo anual de operação	Período analisado	VAE (anual)	Economia anual em relação ao caso base
Caso base (atual)	R\$ 264.650,00 (*)	R\$ 82.211,76	22 anos	R\$ 87.641,82	--
Solução VRV	R\$ 325.130,00	R\$ 51.043,07	15 anos	R\$ 96.644,10	-R\$ 9.002,28
Solução VRV + Redução do pé-direito	R\$ 512.590,00	R\$ 34.846,84	15 anos	R\$ 73.990,98	R\$ 13.650,84
Solução Split:	R\$ 104.100,00	R\$ 68.978,15	15 anos	R\$ 82.908,18	R\$ 4.733,64

(*) A aquisição dos splits do cenário atual será realizada 7 anos após o início da análise, representando a condição existente de equipamentos em diversos estados de conservação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

7. CONCLUSÃO

Com os dados obtidos nas simulações, e na análise econômica realizada comparando ambos os resultados (Tabela 34), é perceptível uma redução no consumo energético ao utilizar um sistema com fluxo de ar variável de 37,9%, podendo chegar a 57,6%. Isto representa um aumento drástico na eficiência energética do sistema de climatização, reduzindo os impactos ambientais envolvidos na geração e distribuição de energia elétrica.

O sistema VRV projetado no cenário sem o rebaixamento do teto resultou em um custo anual equivalente superior ao cenário atual, ou seja, esta solução não é economicamente viável (para os parâmetros econômicos considerados), as demais propostas analisadas, sistema VRV com rebaixamento do pé direito das salas e substituição do sistema split atual, apresentaram uma redução neste custo de R\$ 13.650,84 e R\$ 4.733,64, respectivamente.

Ressalta-se que os sistemas projetados satisfazem as normas de conforto térmico e qualidade de ar, ao contrário do sistema atual. A adoção de alguma das medidas proposta resultará em um aumento no desempenho acadêmico dos estudantes e reduzirá a ocorrência de problemas respiratório entre os usuários da edificação.

Para a continuidade deste projeto, sugere-se a realização do estudo da utilização de forro isolante e um estudo econômico completo dos cenários propostos, envolvendo os custos de mão de obra das reformas, instalação e manutenção dos equipamentos. Este estudo também pode ser replicado para o prédio principal do Centro de Tecnologia e seus demais anexos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKIMOTO, T. et al. Thermal comfort and productivity - Evaluation of workplace environment in a task conditioned office. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 45–50, 1 jan. 2010.

ASHRAE. **2017, ASHRAE fundamental handbook SI**. [s.l: s.n.].

BATIZ, E. C. et al. Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. p. 12, 2009.

CREDER, H. **Instalações de Ar Condicionado**. 6ª Edição ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA, (EPE). **Balanco Energético Nacional**. , 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>

FERREIRA, T. V.; SOARES, J. B. **Nota técnica EPE 030/2018 Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), , 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT_EPE_030_2018_18Dez2018.pdf>

GOETZLER, WILLIAM. ROTH, KURT W. BRODRICK, J. Variable Flow and Volume Refrigerant System. **ASHRAE Journal**, v. 46, n. 1, 2004.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. , 2013.

INMETRO. **Condicionadores de ar -Índices novos - idrs**. , 2021. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores-de-ar-indices-novos-idrs.pdf>>

LENHARO, M. Má qualidade do ar no ambiente de trabalho pode levar a síndrome. **G1**, 2014.

LIU, X.; HONG, T. Comparison of energy efficiency between variable refrigerant flow systems and ground source heat pump systems. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 5, p. 584–589, 1 maio 2010.

LUNA, D. Consumo de energia por ar condicionado triplica. **O Estado de São Paulo**, 2018.

NBR15220, A. **Desempenho térmico de edificações**. , 2005.

NBR16401-1, A. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projetos das instalações**. , 2008.

NBR16401-2, A. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.** , 2008.

NBR16401-3, A. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 3: Qualidade do ar interior.** , 2008.

NBRISO6401, A. **Instalações Centrais de ar-condicionado para Conforto: parâmetros básicos de Projeto.** , 1980.

NICO, M. A.; LIUZZI, S.; STEFANIZZI, P. Evaluation of thermal comfort in university classrooms through objective approach and subjective preference analysis. **Applied Ergonomics**, v. 48, p. 111–120, 1 maio 2015.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural.** 2ª ed. [s.l: s.n.].

SCHIRMER, W. N. et al. A poluição do ar em ambientes internos e a síndrome dos edifícios doentes.(Texto em Português)(Perspectiva general de la enfermedad/trastorno). **Ciencia & Saude Coletiva**, v. 16 (8), p. 3583 (8), 2011.

ZHOU, Y. P. et al. Energy simulation in the variable refrigerant flow air-conditioning system under cooling conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 2, p. 212–220, 1 fev. 2007.

ANEXO A - Levantamento de equipamentos instalados

Tabela 35: Potência de refrigeração de equipamentos de ar-condicionado instalados em diferentes salas do Centro de Tecnologia comparado com o valor ideal obtido através de simulação Tabela 21.

SALA	POTÊNCIA DE REFRIGERAÇÃO INSTALADA (BTU/h)	MODELO DO EQUIPAMENTO	POTÊNCIA ELÉTRICA INSTALADA (W)	POTÊNCIA IDEAL (BTU/h) (Quando aplicável ao projeto)	RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA REAL E IDEAL
165	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3504	--	--
262	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3504	--	--
263	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3504	--	--
203	54000	3 Splits – Cond. Ind.	4884	--	--
218	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3256	--	--
236	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3256	--	--
302	79000	4 Split – Cond. Ind. 1 Janela	7922	--	--
338	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3503	--	--
1110	18000	1 Split – Cond. Ind.	1630	20118,05	89,5%
1205	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3260	24139,39	149,1%
1304	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3260	38798,64	92,8%
1305	36000	2 Splits – Cond. Ind.	3260	31494,35	114,3%
Auditório	432000	9 Cassetes– Cond. Ind.	40050	107911,84	400,3%
Biblioteca	192000	4 Cassetes– Cond. Ind.	17800	75611,84	253,9%