

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Charles de Almeida Ferreira

**EFICÁCIA DAS TÉCNICAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL EM UM PRÉDIO DE
SALAS DE AULA: ESTUDO DE CASO CAMPUS UFSM – CS.**

Santa Maria, RS
2019

Charles de Almeida Ferreira

EFICÁCIA DAS TÉCNICAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL EM UM PRÉDIO DE SALAS DE AULA: ESTUDO DE CASO CAMPUS UFSM – CS.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração de Construção Civil e Preservação Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) com o requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos
Coorientadora: Dra. Minéia Johann Scherer

Santa Maria, RS
2019

Ferreira, Charles de Almeida

Eficácia das técnicas de climatização natural em um
prédio de salas de aula: estudo de caso Campus UFSM-CS /
Charles de Almeida Ferreira.- 2019.

124 p.; 30 cm

Orientador: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Coorientadora: Minéia Johann Scherer

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2019

1. Conforto térmico 2. Comportamento térmico 3.
Climatização natural 4. Simulação Térmica 5. Salas de aula
I. Santos, Joaquim Cesar Pizzutti dos II. Scherer,
Minéia Johann III. Título.

Charles de Almeida Ferreira

EFICÁCIA DAS TÉCNICAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL EM UM PRÉDIO DE SALAS DE AULA: ESTUDO DE CASO CAMPUS UFSM – CS.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) com o requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 13 de março de 2019:

Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ísis Portolan dos Santos, Dra. (UFSM)

Eduardo Grala da Cunha, PhD. (UFPEL)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Para minha esposa Tatiane Porto e meu filho Felipe Ferreira.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria por oportunizar um ensino de qualidade em uma entidade pública e gratuita.

Às direções da UFSM – Campus Cachoeira do Sul, Prof. Dr. José Mario Doleys Soares e Prof. Dr. Hilton Abílio Gründling, e Prof. Dr. Rogério Brittes da Silva e Prof. Dr. Lucas Delongui pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos agradeço pela confiança, pelos conhecimentos compartilhados e por acreditar na importância de um trabalho voltado para a melhoria do ambiente educacional.

À minha Coorientadora: Profa. Dra. Minéia Johann Scherer pela orientação solidária, paciência e dedicação em toda a caminhada.

Aos professores da banca Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha e Profa. Dra. Ísis Portolan dos Santos por destinar seu tempo para avaliar o trabalho.

À equipe do LabCEE-UFPEL, em especial ao professor Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha pelo altruísmo, orientação e ensinamentos sobre simulação computacional e conforto térmico e ao Rodrigo Leitzke, pelo auxílio em todas as horas.

Ao professor Prof. Dr. Giovani Zobot pelos ensinamentos de mecânica dos fluidos e assistência com os cálculos.

Ao professor Prof. Dr. Júlio Pires pelo auxílio com as imagens do campus produzidas em nosso grupo de pesquisa.

Aos colegas Ma. Liége Garlet, Me. Bóris Socolovics, Ma. Mariela Camargo e Arq. Laís Martini, imprescindíveis nessa trajetória.

À família que esteve junto sempre.

À Deus por tudo, mesmo que tenha sido citado por último, sabe que os últimos são os primeiros.

“Entregue as suas obras ao Senhor, e o que você tem planejado se realizará”.
Provérbios 16:3

RESUMO

EFICÁCIA DAS TÉCNICAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL EM UM PRÉDIO DE SALAS DE AULA: ESTUDO DE CASO CAMPUS UFSM – CS.

AUTOR: Charles de Almeida Ferreira

ORIENTADOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Os edifícios destinados ao ensino carecem projetos que considerem relevantes o conforto térmico de seus usuários sem um alto consumo de energia. Este trabalho analisa a eficácia de estratégias de climatização natural para melhorar o índice de conforto térmico de um prédio de salas de aula. São elas: ventilação cruzada, dutos enterrados, chaminés solares, brises, estantes de luz, sombreamento com vegetação, inércia térmica, isolamento térmico, parede trombe e parede de vidro. O prédio está situado na zona bioclimática 2, localizado na Universidade Federal de Santa Maria, no Campus de Cachoeira do Sul. As análises foram realizadas por meio de simulação computacional com o programa EnergyPlus. As diversas técnicas foram simuladas em alternativas individuais e compostas. Primeiro foram medidos os fluxos térmicos e o percentual de conforto térmico do projeto original. A partir dessas informações foi testada a eficácia da inserção de diferentes estratégias de climatização natural na melhoria das condições do conforto térmico da edificação em estudo. O melhor nível de conforto térmico para foi obtido com as seguintes estratégias reunidas: sombreamento com vegetação nas fachadas leste e oeste, pintura branca nos fechamentos opacos (diminuição da absorvância), aumento da inércia térmica, sombreamento com vegetação perpendicular a fachada norte, ventilação cruzada e utilização de vidros duplos nas salas de aula, atingindo um percentual de 88,58%. O menor desconforto por calor resultou quando simulados juntos sombreamento com vegetação nas fachadas leste e oeste, parede branca (diminuição da absorvância), aumento da inércia térmica, sombreamento com vegetação perpendicular a fachada norte, utilização de vidros duplos nas salas de aula com a técnica de ventilação natural dos dutos enterrados (vazão $0,4251\text{m}^3/\text{s}$) obtendo um índice de 3,97%. Concluiu-se que as estratégias de climatização natural, aplicadas em prédios de salas de aula na região estudada, são eficazes para o aumento do nível de conforto térmico e que quando somadas elas têm melhores resultados, justificando a sua utilização nos projetos com temática semelhante.

Palavra-chave: Comportamento térmico. Conforto térmico. Climatização natural. Simulação Térmica. Salas de aula.

ABSTRACT

EFFECTIVENESS OF NATURAL AIR CONDITIONING TECHNIQUES IN A BUILDING OF CLASSROOMS: CASE STUDY CAMPUS UFSM-CS.

AUTHOR: Charles de Almeida Ferreira
ADVISOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

The buildings destined to the education lack projects that consider the thermal comfort of its users without high consumption of energy. This dissertation analyzes the effectiveness of natural air conditioning strategies to improve the thermal comfort index of a classroom building. They are: cross ventilation, Earth tubes, solar chimneys, brises, light shelf, shading with vegetation, thermal inertia, thermal insulation, trombe wall and glass wall. The building is located in the bioclimatic zone 2, located at the Universidade Federal de Santa Maria, on the campus of Cachoeira do Sul. The analyzes were performed by means of computer simulation to the EnergyPlus program. The different techniques were simulated in individual and composite alternatives. First the thermal flows and the percentage of thermal comfort of the original design were measured. From this information the effectiveness of the insertion of different natural climatization strategies in the improvement of the thermal comfort conditions of the building under study was tested. The best level of thermal comfort was obtained with the following strategies: shading with vegetation on the east and west facades, white paint on opaque closures (decrease in absorptance), increase in thermal inertia, shading with vegetation perpendicular to the north facade, cross ventilation and use of double glazing in classrooms, reaching a percentage of 88.58%. The lower heat discomfort resulted when shadowing vegetation on the east and west facades, white wall (decrease of the absorptance), increased thermal inertia, vegetation shading perpendicular the north facade, use of double glazing in classrooms with the technique of natural ventilation of the Earth tubes (flow $0.4251\text{m}^3 / \text{s}$), obtaining an index of 3.97%. It was concluded that the natural air conditioning strategies applied in classrooms in the studied region are effective for increasing the level of thermal comfort and that when added they have better results, justifying their use in projects with similar themes.

Key words: Thermal behavior. Thermal comfort. Natural air conditioning. Thermal Simulation. Classrooms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Zonas bioclimáticas do Brasil.....	24
Figura 2- Conforto adaptativo - ASHRAE 55	27
Figura 3 - Graus-hora e horas de desconforto	29
Figura 4- Estratégias de Olgyay	30
Figura 5 – Estratégias de climatização da NBR 15220	31
Figura 6 - Carta bioclimática de Santa Maria.....	32
Figura 7 - Esquema de funcionamento dos dutos enterrados	34
Figura 8 - Esquema de funcionamento das chaminés de ventilação	35
Figura 9 - Exemplo de carta solar produzida pelo programa Analysis Sol-Ar.....	38
Figura 10 - Esquemas das prateleiras de luz.....	38
Figura 11 - Exemplo de sombreamento com vegetação.....	39
Figura 12 - Técnicas de aquecimento solar passivo	42
Figura 13- Esquema de uma parede trombe.	43
Figura 14 - Esquema Metodológico	49
Figura 17 - Localização do Campus UFSM-CS.....	50
Figura 18 - Implantação Campus UFSM-CS	51
Figura 19 – Vista das quadras	51
Figura 20 - Planta Baixa Pavimento Tipo	52
Figura 21 - Cores indicadas no projeto original	52
Figura 22 - Corte transversal	53
Figura 23 –Vista frontal da modelagem	54
Figura 24- Vista posterior da modelagem	54
Figura 25 - Disposição das janelas – (a) 100cm de altura (b) 30cm de altura	61
Figura 26 - Corte do brise e máscara de sombreamento	62
Figura 27 - Corte da estante de luz e máscara de sombreamento.....	62
Figura 28 - Sombreamento oeste-leste - máscara de sombreamento para a fachada norte.....	63
Figura 29 - Sombreamento oeste-leste - máscara de sombreamento para a fachada sul.....	64
Figura 30 - Sombreamento oeste-leste - máscara de sombreamento para as fachadas oeste e leste.....	64
Figura 31 - Sombreamento norte Perpendicular - Planta baixa e máscara de sombreamento.....	65
Figura 32 - Sombreamento Norte Paralelo - Planta baixa.....	65
Figura 33 - Tijolo furado 11x14x24	65
Figura 34 - Tijolo maciço 11,5x5x24	66
Figura 35 - Parede trombe (a) e parede de vidro (b)	67
Figura 36 - Detalhe do projeto da chaminé	69
Figura 37 - Chaminés solares	70
Figura 40 - Esquema do método de análise com as melhores soluções	82
Figura 37 - Esquema da análise comparativa	85
Figura 42 - Esquema de cálculo de dutos e chaminés.	104
Figura 43 - Diagrama de Moody	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de PTS para cada espécie em cada mês do ano.	40
Tabela 2 - Dados de localização e clima (médias anuais)	48
Tabela 3 - Zonas Térmicas	55
Tabela 4 - Agenda de ocupação.....	56
Tabela 5 - Agenda de Iluminação e Equipamentos	57
Tabela 6 - Configuração dos materiais.....	58
Tabela 7 - Classificação das estratégias	60
Tabela 8 - Comparação das características térmicas das paredes	66
Tabela 9 - Índices de conforto térmico do projeto original	75
Tabela 10 - Graus-hora de resfriamento e aquecimento e horas em desconforto do projeto original.....	76
Tabela 11 - Estratégias individuais com ventilação natural calculada	79
Tabela 12 - Estratégias individuais indicadas pela análise dos fluxos térmicos	80
Tabela 13 - Comparação das simulações individuais com ventilação natural estimada com dutos enterrados e chaminés solares conjuntamente	81
Tabela 14 - Resultado da avaliação do conforto térmico das estratégias compostas indicadas pelos fluxos térmicos	83
Tabela 15 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico.....	83
Tabela 16 - Estratégias climatização natural compostas reunidas.....	84
Tabela 17 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos somadas as chaminés solares e dutos enterrados	86
Tabela 18 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico somadas as chaminés solares e dutos enterrados - 100% de ocupação	86
Tabela 19 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos somadas ao conforto térmico e somados as chaminés solares e dutos enterrados - 100% de ocupação	87
Tabela 20 - Resumo dos resultados de conforto térmico.....	88
Tabela 21 - Resumo do desconforto por calor com ventilação natural	89
Tabela 22 - Resumo dos resultados de desconforto por calor (dutos enterrados e chaminés solares).....	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Fluxos térmicos das salas de aula do primeiro pavimento (W)	74
Gráfico 2 - Fluxos térmicos das salas de aula do segundo pavimento (W).....	74
Gráfico 3 - Fluxos térmicos das salas de aula do terceiro pavimento (W).....	75
Gráfico 4 - Variação das temperaturas - (Graus-W x Horas/ano)	77
Gráfico 5 - Eficiência da ventilação em janelas de 100cm e 30 cm	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CMMAD	Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONSU	Conselho Superior
ECO 92	Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento
PTS	Percentual de Transmissão Solar
RIO+10	Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
Rio+20	Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações. Comerciais, de Serviços e Públicas
SCDC	Sistema de Climatização por Dutos Subterrâneos
TCSA	Trocadores de Calor Solo-Ar
T _{oc}	Temperatura operativa de conforto;
T _{ext}	Temperatura média mensal externa.
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFSM-CS	Universidade Federal de Santa Maria – Campus Cachoeira do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA	21
2.2	CONFORTO TÉRMICO	25
2.2.1	Graus-hora	28
2.3	ESTRATÉGIAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL	29
2.3.1	Ventilação natural	33
2.3.1.1	<i>Ventilação cruzada</i>	33
2.3.1.2	<i>Dutos enterrados</i>	33
2.3.1.3	<i>Chaminé solar</i>	35
2.3.1.4	<i>Cálculo de vazão entre chaminé solar e dutos enterrados</i>	36
2.3.2	Sombreamento e iluminação natural	36
2.3.2.1	<i>Brisas</i>	37
2.3.2.2	<i>Estantes de luz</i>	38
2.3.2.3	<i>Sombreamento com vegetação</i>	39
2.3.3	Inércia térmica	40
2.3.4	Isolamento Térmico	41
2.3.5	Aquecimento solar passivo	41
2.3.5.1	<i>Parede trombe</i>	42
2.3.5.2	<i>Parede de vidro</i>	43
2.3.6	Absortância Solar	44
2.4	ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA EM AMBIENTES ESCOLARES	45
2.5	SIMULAÇÃO ENERGÉTICA	46
3	METODOLOGIA	48
3.1	LEVANTAMENTO DO PROJETO DA EDIFICAÇÃO	49
3.1.1	Projeto do prédio de salas de aula da UFSM-CS	50
3.2	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO CONFORTO TÉRMICO DO PROJETO ORIGINAL	53
3.2.1	Modelagem e cadastro de dados	53
3.3	AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DAS ESTRATÉGIAS INDIVIDUAIS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL	60
3.3.1	Estratégias com ventilação natural calculada	60
3.3.1.1	<i>Ventilação cruzada</i>	60
3.3.1.2	<i>Brisas</i>	61
3.3.1.3	<i>Estantes de luz</i>	62
3.3.1.4	<i>Sombreamento com vegetação</i>	63
3.3.1.5	<i>Inércia Térmica</i>	65
3.3.1.6	<i>Isolamento térmico</i>	66
3.3.1.7	<i>Parede trombe e parede de vidro</i>	67
3.3.1.8	<i>Absortância</i>	68
3.3.2	Estratégias com ventilação natural estimada	68
3.3.2.1	<i>Dutos enterrados</i>	68
3.3.2.2	<i>Chaminé solar</i>	69
3.3.2.3	<i>Avaliação das estratégias de climatização natural simuladas por ventilação natural estimada simuladas em conjunto</i>	70

3.4	AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DAS SOLUÇÕES COMPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL.....	70
3.4.1	Estratégias compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos.....	71
3.4.2	Estratégias compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico	71
3.4.3	Estratégias compostas reunidas.....	72
3.5	AVALIAÇÃO COMPARATIVA	72
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4.1	ANÁLISE COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO CONFORTO TÉRMICO DO PROJETO ORIGINAL	73
4.1.1	Análise do comportamento térmico do projeto original	73
4.1.2	Análise do conforto térmico do projeto original.....	75
4.2	ANÁLISE DO CONFORTO TÉRMICO DAS ESTRATÉGIAS INDIVIDUAIS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL.....	77
4.2.1	Seleção da altura de janela para a ventilação cruzada.....	77
4.2.2	Análise do conforto térmico das estratégias de climatização natural simuladas individualmente com ventilação natural calculada	78
4.2.3	Análise do conforto térmico das estratégias de climatização natural com ventilação natural estimada simuladas individualmente	80
4.3	ANÁLISE DO CONFORTO TÉRMICO DAS SOLUÇÕES COMPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL.....	81
4.3.1	Análise das estratégias de climatização natural compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos.....	82
4.3.2	Análise das estratégias de climatização natural compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico.....	83
4.3.3	Análise das estratégias climatização natural compostas reunidas.....	84
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA	84
4.5	RESUMO DAS ANÁLISES DE CONFORTO TÉRMICO E DESCONFORTO POR CALOR.....	88
5	CONCLUSÕES.....	91
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA OUTROS TRABALHOS DE PESQUISA.....	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
	ANEXOS.....	104

1 INTRODUÇÃO

O homem contemporâneo está acostumado com as tecnologias e o conforto gerado por elas. Sentir-se confortável em um recinto depende de vários fatores ambientais como luminosidade, acústica, temperatura, umidade, qualidade do ar e olfativa (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004, p. 46).

Com o movimento moderno, a internacionalização da arquitetura e as tecnologias de climatização os projetistas acomodaram-se na busca de estratégias projetuais para criar um ambiente de temperatura agradável recorrendo às máquinas elétricas para realizar este ajuste. As técnicas de pré-fabricação e as padronizações de projetos, alicerçados somente na economia de materiais e na funcionalidade, se adequaram facilmente às justificativas projetuais, em especial nos órgãos públicos.

A gestão pública deve primar pela qualidade de suas edificações aliada ao baixo consumo mensal e ao conforto térmico, proporcionando aos usuários melhores serviços e condições de trabalho aos servidores.

O Diário Oficial da União do dia quatro de junho de 2014 publicou a Instrução Normativa N° 2 (BRASIL, 2014, p.102) que torna obrigatória a Etiquetagem de Edificações Públicas Federais. A normativa manifesta a preocupação dos órgãos federativos em melhorar a eficiência dos projetos de arquitetura, impondo uma diminuição do consumo de energia nos prédios públicos. Esta certificação é uma comprovação de que a edificação é eficiente energeticamente, isto é, que gasta menos energia com um padrão mínimo de conforto.

As universidades públicas são órgãos federativos e estão submetidas à exigência da Instrução Normativa N° 2. Sendo um órgão educacional, a universidade exige aos trabalhadores da educação e aos alunos um esforço intelectual diário. O ambiente de trabalho e estudos deve ser adequado para auxiliar essas pessoas na produção do ensino, da pesquisa e extensão.

A melhoria do conforto térmico e a diminuição do gasto de energia, nas construções de prédios escolares da união, tem embasamento no documento final do Fórum Nacional de Educação, que em suas proposições e estratégias descreve como meta a ser implantada pelos municípios, estados e união: “Implementar modelos de construção e manutenção de escolas que atendam aos requisitos de sustentabilidade na gestão de água, energia, solo, resíduos, alimentos, respeitando as expectativas das comunidades locais e reforçando a cidadania” (BRASIL, 2014, p. 57).

Ambientes confortáveis são essenciais à produção acadêmica. Unir conforto térmico com baixo custo energético, utilizando técnicas sustentáveis, é um objetivo básico para qualquer

projeto nas edificações universitárias.

Batiz, et. al. (2009, p. 487) relata sobre a avaliação do conforto térmico no aprendizado dos alunos e conclui que “as condições térmicas da sala influíam na percepção e na memória”.

Tavares (2000, p.153) entende que o conforto térmico faz parte da ergonomia e estudou a influência desta no processo de ensino-aprendizagem e afirma que “pessoas com calor ou frio, barulho que perturbam e ambientes insalubres são determinantes para que o mesmo se torne improdutivo”.

Um projeto de arquitetura para um prédio de salas de aula de uma universidade necessita contemplar estratégias que tornem o ambiente confortável termicamente e sejam eficientes no consumo de energia. Para tanto é preciso que o projetista tenha conhecimento do características termofísicas dos materiais de construção, que possa saber avaliar a as condições ambientais do sítio em que será implantado e tenha conhecimento de estratégias naturais capazes de auxiliar na climatização do ambiente que pretende construir.

Este trabalho registra um estudo do comportamento térmico de um prédio de salas de aula da Universidade Federal de Santa Maria, que está sendo implantado no novo campus em construção na cidade de Cachoeira do Sul. Utilizando-se de simulações computacionais no programa EnergyPlus, foram feitas análises das condições térmicas do edifício em estudo, propondo estratégias de climatização natural, avaliando sua eficácia para a melhoria do conforto térmico dos usuários.

Esta dissertação busca acrescentar conhecimentos aos projetistas de prédios de salas de aula, implantados na zona bioclimática 2 do Brasil, auxiliar na compreensão do comportamento térmico e na aplicação de estratégias de climatização natural, visando a melhoria do conforto térmico nas edificações educacionais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a potencialidade da utilização de estratégias de climatização natural para a melhoria do conforto térmico de um prédio de salas de aula da Universidade Federal de Santa Maria, no Campus de Cachoeira do Sul, na zona bioclimática 2.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender a relação entre o projeto original e o nível de conforto térmico da edificação.

- Analisar isoladamente a eficácia das estratégias de climatização natural indicadas para a melhoria do conforto térmico da edificação em estudo por meio de simulação computacional.
- Avaliar a eficácia das estratégias de climatização natural agrupadas através de parâmetros indicados pelo comportamento térmico e pelo conforto térmico.
- Verificar as melhorias obtidas no conforto térmico indicando a utilização das melhores técnicas e combinações.

1.3 JUSTIFICATIVA

Estar confortável dentro de ambientes educacionais resulta em um melhor desempenho de professores, servidores e alunos. Ao citar os efeitos do calor e do frio no corpo humano relacionando as tarefas intelectuais Grandjean (1998, p. 294) expõe que:

Calor excessivo leva primeiro a um cansaço e sonolência, que reduz a prontidão de resposta e aumenta a tendência de falhas. Com esse amortecimento da atividade das pessoas, a natureza pretende reduzir a formação de calor no interior do organismo. Se, por outro lado, o organismo está ameaçado de resfriamento, então entra em ação uma necessidade de aumento de atividade, com o que também a atenção – principalmente a concentração para o trabalho intelectual – diminui.

Para que se tenha conforto com preservação dos recursos naturais é preciso avançar no aprimoramento da eficiência energética no setor da construção civil. Buscar alternativas de climatização natural para que se alcance um bom índice de conforto térmico nas edificações educacionais é uma opção sustentável para atingir esse objetivo.

Conhecer o comportamento térmico dos materiais e elementos das construções equipa o projetista de informações necessárias para a melhoria das condições de conforto térmico no interior de edifícios.

Desta forma, analisar o comportamento térmico do Prédio de Salas de Aula da Universidade Federal de Santa Maria, no Campus de Cachoeira do Sul, mostrará as deficiências e qualidades do prédio em relação ao conforto térmico dos usuários deste ambiente educacional.

Os prédios foram projetados com previsão de climatização por meio de condicionadores de ar individuais, instalados na parede norte e que possuem o equipamento dividido em duas partes, evaporador dentro do recinto e condensador fora do recinto. Esse tipo de equipamento gera um alto consumo de energia e desconforto acústico, portanto não é uma estratégia projetual eficiente.

Conhecendo o comportamento térmico da edificação, avaliando o conforto gerado pelas decisões de projeto, é possível apresentar soluções sustentáveis que não consumam energia elétrica, e avaliá-las dimensionando sua eficiência.

Sendo assim, esta pesquisa se justifica no momento que pretende reunir dados não existentes referentes ao comportamento térmico do projeto em questão, que possam contribuir para a melhoria do conforto térmico da edificação, e fornecer subsídios para elaboração de projetos de edifícios para uso educacional na zona bioclimática 2.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo encontra-se uma análise crítica sobre arquitetura bioclimática, conforto térmico, estratégias de climatização natural e simulação computacional das cargas térmicas em edificações. Esses assuntos são relevantes para o entendimento do comportamento térmico e o desempenho das estratégias de climatização natural em um prédio educacional na zona bioclimática 2.

2.1 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

Toda a construção está inserida em um ecossistema composto por um conjunto de seres vivos que estão sujeitos ao clima. Os projetos de arquitetura devem ser concebidos para adaptarem-se ao ambiente.

Desde o início da civilização o homem procura um local abrigado, seguro e confortável para viver. A execução deste espaço constituiu-se inicialmente de materiais básicos como a madeira, a terra e a pedra. Com a evolução da construção e o aumento das complexidades técnicas, surgem os “impactos negativos ao meio ambiente, quer devido à energia que utilizam os edifícios no seu funcionamento, quer pelos recursos utilizados (energia, água, matérias-primas), como pela produção de resíduos” (VAZ; FERREIRA; LUSO; FERNANDES, 2014, p.1).

Com as grandes navegações, a evolução do comércio ampliou as trocas de mercadoria. A arquitetura começa a trabalhar com materiais oriundos de diferentes regiões do planeta, porém ainda se mostra regionalizada em sua forma de expressão. Com a ascensão do movimento moderno e do estilo internacional, perde-se muito das técnicas regionais mais adaptadas ao clima, e os novos projetos passam a exibir materiais universalizados (HERNANDEZ, 2013, p.14).

A grande evolução tecnológica da última metade do século XX deu ao homem a capacidade de controlar o clima do ambiente construído, condicionando-o por meios mecânicos. Essa característica traz a necessidade de um grande consumo de energia, elevando muito a produção de gás carbônico e chegando aos nossos dias com graves problemas de ordem climática em escala mundial.

Neves (2006, p.17) relata em seu trabalho um conceito sobre arquitetura bioclimática:

[...] engloba uma série de valores relacionados à redução de impactos ambientais,

conservação de energia e obtenção de conforto ambiental no projeto construído. Seu estudo e aplicação visam maior inserção da arquitetura no clima e contextos locais. Importantes estratégias projetuais relacionadas à questão consistem no aproveitamento dos recursos naturais e condicionantes do clima local para melhor integrar o edifício ao entorno e na obtenção de conforto através do uso de sistemas passivos de condicionamento.

A arquitetura bioclimática tem uma estreita relação com a arquitetura vernacular, da qual resgata técnicas seculares e as aprimora com o conhecimento científico. Destacam-se alguns princípios:

Os princípios da arquitetura bioclimática têm como objetivo a potenciação do legado da arquitetura vernacular. A construção de edifícios bioclimáticos (bioconstrução) tem como base a adaptação ao clima local e a adoção de um conjunto de práticas e técnicas assentes na utilização de recursos naturais e locais, minimizando o impacto ambiental e o consumo de energia. Tem ainda como objetivo otimizar as condições de conforto e saúde dos seus utilizadores. A arquitetura bioclimática consiste em incorporar esses princípios na concepção dos edifícios (VAZ, et al. 2014, p.3).

A conceito de arquitetura bioclimática está integrado à ideia de sustentabilidade. Na conferência de Estocolmo, promovida pelas Nações Unidas, começou-se a discutir com mais ênfase o tema da conservação do meio ambiente. Neste encontro foi criado o PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) que resultou na formação da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (TRIPOLI, 2013, p. 5). Em 1987, esta mesma comissão, publica o Relatório Brundtland que define pela primeira vez desenvolvimento sustentável como “aquele que atende as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades” (CMMAD, 1991, p. 46). A segunda conferência promovida pela ONU sobre o meio ambiente foi a ECO-92 no Rio de Janeiro, depois a RIO+10, em Joanesburgo, no ano de 2002 e novamente no Rio de Janeiro, em 2012, a RIO+20. Esses encontros consolidam a preocupação com a sustentabilidade e incentivam os programas de conservação de energia (TRIPOLI, 2013).

A sustentabilidade na construção pode ser entendida como um conceito criado para auxiliar na resolução dos problemas da urbanização de forma pragmática, tais como “escassez de recursos e de contaminação, além da mudança climática” (GUERRA; LOPES; 2015, pag.3).

Segundo Manhães (2014, p, 21):

O conceito de Construção Sustentável baseia-se no desenvolvimento de um modelo que faça com que a construção civil enfrente e proponha soluções aos principais problemas ambientais de época atual, sem abdicar à moderna tecnologia e à criação de edificações que supram as necessidades de seus usuários. Uma construção sustentável une desde as decisões tomadas em projeto, passando por sua construção

até os reflexos de sua vida útil, tanto da edificação, como do entorno/comunidade onde está inserida. Nela, valoriza-se o uso de materiais e técnicas que resultem menores impactos ambientais e sociais.

Conhecer o clima e encontrar estratégias naturais de projeto das edificações para adequá-la as sensações de conforto do ser humano é tarefa da arquitetura. O termo arquitetura bioclimática alerta quanto a sustentabilidade e preservação ambiental. Vários autores relatam que os irmãos Olgay, em 1963, foram precursores nestes estudos, inclusive citando-os como formuladores do conceito de projeto bioclimático. Seus estudos sobre a arquitetura bioclimática, contêm um roteiro para sua aplicação baseado na análise de dados climáticos da região, na avaliação biológica das sensações humanas, na pesquisa de estratégias tecnológicas para adaptação ao clima e aplicação destes conhecimentos no projeto de arquitetura (GARLET, 2016, p. 18; FLORES, 2014, p. 13; RUSSI et al., 2012, p. 115).

Olgay (1963) relacionou a temperatura do ar com a umidade relativa, medidos exteriormente ao edifício, em um gráfico cartesiano. Neste gráfico delimitou uma zona de conforto e nos intervalos subsequentes, acima ou abaixo, Olgay indicou curvas onde recomenda estratégias bioclimáticas para melhorar o conforto quando as variáveis indicarem esses pontos no gráfico.

Givoni (1969) considerou a diferença existente entre o ambiente externo e o interno do edifício. Ao estudar o gráfico de Olgay ele indica estratégias de melhoria do conforto “relacionando as alterações das condições climáticas externas através de princípios básicos de projeto da edificação, juntamente com propriedades de sua envoltória” (RUSSI et al, 2012, p. 115).

Diferente de Olgay que cruzou os dados entre a umidade relativa e a temperatura do termômetro de bulbo seco, Givoni utiliza como base a carta psicrométrica. Esta relaciona vários parâmetros, são eles: temperatura do termômetro de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa do ar, umidade absoluta, ponto de orvalho, volume específico e entalpia. Sobre estes dados, Givoni estabelece uma zona de conforto térmico para países desenvolvidos, que se localiza entre 20% e 80% de umidade e entre 18°C a 29°C de temperatura (FAGUNDES, 2016, pag. 25).

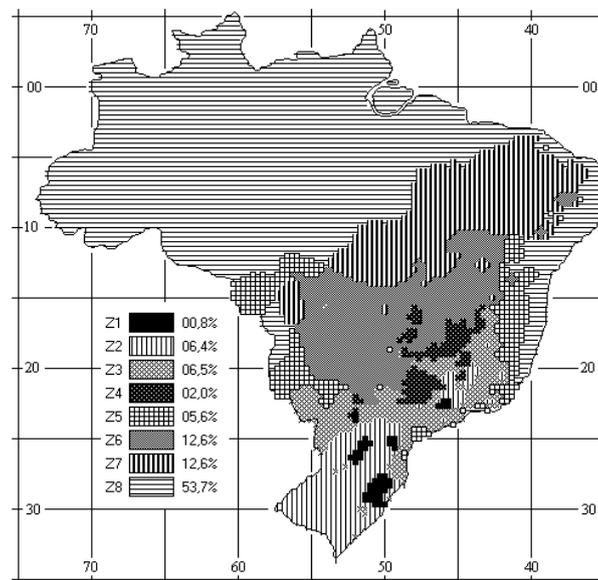
Neste diagrama, ele propõe um espaço no qual a relação entre as variáveis gera uma zona de conforto. Esta região varia entre 18°C a 25°C no inverno e de 20°C a 27°C no verão, com a umidade absoluta abaixo de 10 g/kg. Quanto mais a umidade sobe, decresce o limite da temperatura até o limiar de 15 g/kg. Ele considera uma diferenciação entre as extremidades deste zoneamento para países desenvolvidos e para países em desenvolvimento, afirmando que

nos países em desenvolvimento as pessoas toleram uma faixa de 2°C mais elevada e uma quantidade maior de vapor d'água ampliada em 2 g/kg como tolerável para seu conforto térmico. (BARBOSA, 1997, pag. 35).

Nestes parâmetros, a zona de conforto para os países em desenvolvimento vai até 29,7°C, com velocidade do ar de 1,5m/s, e umidade absoluta em 17 g/kg.

O Brasil possui características climáticas muito diferenciadas por ser um país de dimensões continentais. A NBR 15220 - Parte 3 - Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (2005, p. 2) divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas (Figura 1).

Figura 1- Zonas bioclimáticas do Brasil



Fonte: (ABNT, 2005, p. 3).

Essas zonas são áreas do território que possuem um clima muito semelhante. Para cada uma foi estabelecido um conjunto de recomendações construtivas como: tipo de aberturas para ventilação, proteção das aberturas, vedações externas (tipo de parede externa e tipo de cobertura) e estratégias de condicionamento térmico passivo. Essas indicações tem a finalidade de melhorar o desempenho térmico das edificações, moldando-as ao seu clima de referência.

Entender o clima, conhecer as necessidades de conforto do ser humano e encontrar estratégias para supri-lo com o menor gasto de energia e recursos naturais é responsabilidade da arquitetura e da engenharia. As pesquisas na área da arquitetura bioclimática têm o intuito de criar técnicas que possibilitem cumprir este objetivo.

2.2 CONFORTO TÉRMICO

O homem é um ser homeotérmico, um animal de sangue quente, portanto sua temperatura tem a tendência de manter-se constante evitando as variações do clima. A alimentação gera energia e mantém o calor do corpo, porém as trocas térmicas com o meio ambiente podem desequilibrar o balanço térmico do organismo. Quando o corpo despende muita energia para produzir calor ou não consegue refrigerar-se o suficiente, sente-se desconfortável. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014, p. 43).

Projetar uma edificação que proporcione o mesmo nível de conforto a todos os seus usuários é impossível. Porém adequá-la a um índice de satisfação pré-estabelecido é uma alternativa viável. Alguns pesquisadores em seus trabalhos buscaram estabelecer métodos de mensuração do índice de satisfação dos ocupantes de uma edificação. Essas pesquisas se dividem em estáticas e adaptativas.

As pesquisas de Fanger em 1972, na Dinamarca, são estáticas e embasaram normas internacionais que descreveram índices de conforto: o PMV (Predicted Mean Vote), o Voto Médio Estimado, o PPD (Predicted Percentage off Dissatisfied) e a Porcentagem Estimada de Insatisfeitos. Estes índices relacionaram “o calor do corpo perdido pela pele em função da área superficial do corpo, calor interno produzido e temperatura média da pele” (VOLTANI; LABAKI, 2008, p. 1).

Fanger (1970, p. 41) demonstrou em uma equação de conforto o relacionamento entre as variáveis ambientais temperatura radiante média, velocidade do ar, umidade relativa, e temperatura do ar com fatores do indivíduo: a atividade física e a vestimenta.

No seu trabalho ele apresentou o conceito de Voto Médio Estimado que é uma variante que tem por finalidade demonstrar em valor numérico a sensação de calor e frio do ser humano. Ao analisar 1300 pessoas em câmaras térmicas, que atribuíram votos de -3 a +3, sendo 0 a neutralidade térmica, que é a condição na qual uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente a seu redor. Com estes dados ele chega a uma Percentagem Estimada de Insatisfeitos que pode auxiliar na análise das condições de conforto nas edificações.

Michel Humphreys, por sua vez, compilou mais de 30 estudos em várias partes do mundo, em lugares que variam da Suíça ao Irã, em condições reais onde as pessoas desempenham suas atividades corriqueiras e vestem-se conforme suas necessidades e costumes. Ele afirmava que a temperatura de conforto não é uma constante, mas varia de acordo com a estação e temperatura a que as pessoas estão acostumadas (HUMPHREYS, 1979). O ser humano adapta-se as situações climáticas, pois tem a capacidade de alterar o ambiente e de adequar suas vestimentas.

Essas modificações variam também com as suas expectativas quanto a amplitude térmica no decorrer do tempo. Quanto maior a facilidade de interação, maior será sua adaptabilidade à amplitude térmica.

O modelo adaptativo vai além dos fatores físicos, também considera “os conceitos de aclimatação, e os fatores considerados podem incluir características inerentes à demografia (gênero, idade, classe social), contexto (composição da edificação, estação, clima) e cognição (atitudes, preferências e expectativas)” (LAMBERTS et al., 2011, p. 11).

O homem utiliza de três formas para se adaptar as alterações do clima: mudanças no comportamento (mudar a vestimenta, trocar de atividade, abrir e fechar janelas, entre outras), alteração da fisiologia (adaptações termorreguladoras, tanto genéticas como de aclimatação) e adaptações psicológicas (hábitos e repetições comportamentais).

O contraste entre a temperatura externa e interna, bem como o valor médio mensal das temperaturas influenciam na percepção de calor do indivíduo.

(...) a adoção da avaliação pelo modelo adaptativo ao invés do estacionário aumenta consideravelmente os limites de conforto nos períodos quentes e não gera grandes alterações nos limites de conforto para os períodos frios, dada a incapacidade do corpo humano se aclimatar ao frio. Portanto, optar por essa abordagem e, conseqüentemente, pela construção de edifícios operáveis termicamente, representa além da garantia de conforto, reduções nos níveis de consumo energético da edificação. Ainda sim, muitas leis e normas utilizam o modelo estacionário como critério geral e adotam o modelo adaptativo, em alguns casos específicos, de maneira opcional. (MILAN, 2015, p. 35).

As pesquisas de campo feitas por Humphreys (1979) mostram que a temperatura de conforto está diretamente relacionada com a temperatura média mensal externa, não sendo preciso indicar uma temperatura interna única, o que diminuiria o consumo de energia. “Aliado a isso, projetos adequados, que permitam o ganho de calor solar no inverno em climas frios, e armazenamento de ar frio através de ventilação noturna no verão em climas quentes, também representariam boas medidas de conservação de energia” (XAVIER, 2000, p. 22).

A norma americana ASHRAE 55 (2010) expõe que o conforto térmico é o estado da mente que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. Esta norma descreve um método para avaliar as condições térmicas aceitáveis em lugares com ventilação natural. Embora ela considere índices de conforto através do PPD e PMV, ela “incorpora ainda inovações encontradas nas pesquisas mais recentes tais como a utilização de valores elevados de velocidade do ar, o que faz com que se aumente o intervalo aceitável das condições térmicas em um ambiente” (LAMBERTS et al, 2011, p. 21).

Figueiredo e Frota (2008, p. 2) quando descrevem a ASHRAE 55 afirmam que ela está

alicerçada na teoria adaptativa de conforto térmico, ressaltando que “os usuários irão tolerar maiores flutuações nas condições ambientais se eles tiverem maior controle sobre elas, permitindo velocidades do ar mais altas”. Esse argumento assegura maior fundamentação para decisões projetuais, possibilitando que estratégias de climatização natural possam ser incorporadas nos projetos auxiliando no conforto térmico do usuário.

Treichel et. al (2016, p. 1900) confirma o modelo adaptativo de Dear e Brager (1997), onde baseia-se a ASHRAE 55 (2013) como um método que se destaca na avaliação do conforto térmico das edificações. Salaria que é um método válido somente para os ambientes climatizados naturalmente e que relaciona as temperaturas internas e externas do ambiente, sendo que é por meio da temperatura externa que se determina a temperatura operativa de conforto. A temperatura operativa de conforto é determinada através da equação:

$$T_{oc} = 17,8 + 0,31 T_{ext} \quad (1)$$

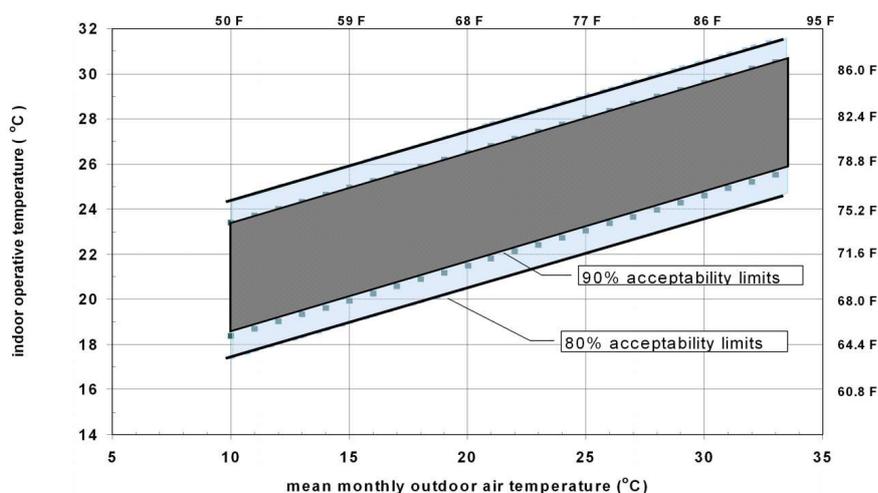
Onde:

T_{oc} = Temperatura operativa de conforto;

T_{ext} = Temperatura média mensal externa.

Se a temperatura operativa de conforto variar entre $+2,5\text{ °C}$ e $-2,5\text{ °C}$ o grau de conforto se estabelece em 90%, se variar entre $+3,5\text{ °C}$ e $-3,5\text{ °C}$ cai para 80% (Figura 2).

Figura 2- Conforto adaptativo - ASHRAE 55



Fonte: (ASHRAE 55, 2010, p. 12)

A ASHRAE 55 (2013) aplicada juntamente com a simulação energética é uma forma que “possibilita verificar, por meio de simulação computacional, se uma proposta arquitetônica proporciona desejável conforto térmico, principalmente nas estações mais quentes, sem o uso de equipamentos mecânicos” (HUMPHREYS; RIJAL; NICOL, 2013 apud. NICO-RODRIGUES et al. 2015, p. 8)

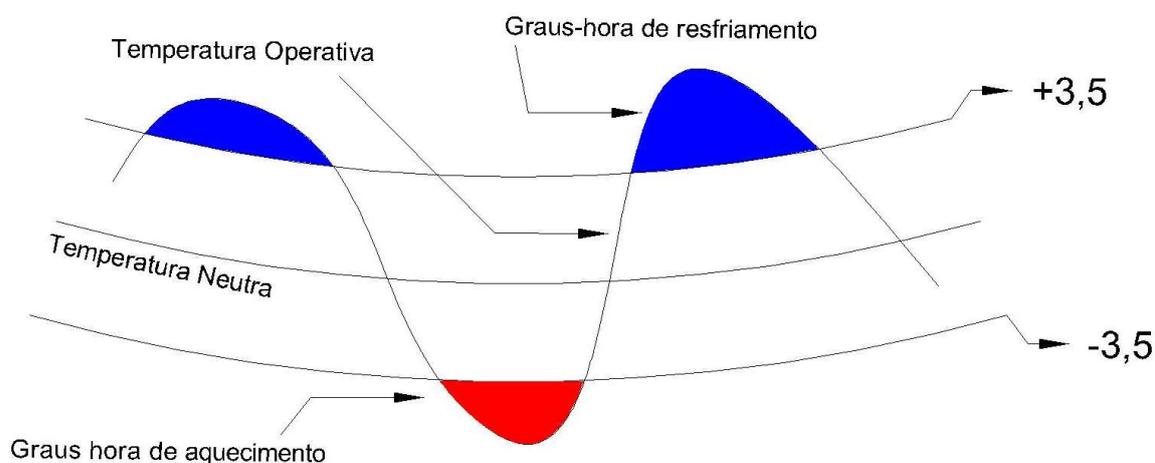
As normas brasileiras, NBR 15220 (2003) e a NBR 15575 (2013), trazem indicadores físicos da envoltória que direcionam para um nível mínimo de conforto térmico seja alcançado pelas edificações. A NBR 15220 (2003) recomenda valores para a Transmitância ($U - W/m^2.K$), Atraso térmico ($\phi - \text{Horas}$) e Fator solar (FS - %), enquanto a NBR 15575 (2013) exige índices mínimos de Transmitância ($U - W/m^2.K$) e Capacidade térmica (CT - $kJ/m^2.k$) conforme cada zona bioclimática brasileira. Enquanto a NBR 15220 (2003) tem caráter informativo a NBR 15575 (2013) tem postura de lei.

2.2.1 Graus-hora

Graus-hora são um parâmetro que indica a quantidade de graus que estão acima da temperatura máxima de referência para o conforto ou abaixo da temperatura mínima de conforto. Sorgato (2009, p. 108) descreve este indicativo como “a somatória da diferença da temperatura horária, quando esta se encontra superior a temperatura de base, no caso de resfriamento; ou inferior a temperatura de base, para graus-hora de aquecimento”. O mesmo pesquisador afirma que os graus-hora são calculados geralmente para a temperatura do ar e em seu trabalho, calcula o parâmetro relacionando com a temperatura operativa.

Este dado pode ser reconhecido de duas formas: Graus-hora de resfriamento e Graus-hora de aquecimento. O manual do Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais – RTQ-R (INMETRO, 2009) descreve os graus-hora de resfriamento como o “Somatório da diferença entre a temperatura operativa horária e a temperatura de base, quando a primeira está acima da temperatura de base”. Considerando-se a faixa de conforto de 80% da ASRHAE 55 (2013), estipula-se a temperatura de base para os graus-hora de resfriamento, a temperatura neutra somada a $3,5^{\circ}C$ e a temperatura base para aquecimento a temperatura neutra diminuída de $3,5^{\circ}C$ (Figura 3).

Figura 3 - Graus-hora e horas de desconforto



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

2.3 ESTRATÉGIAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL

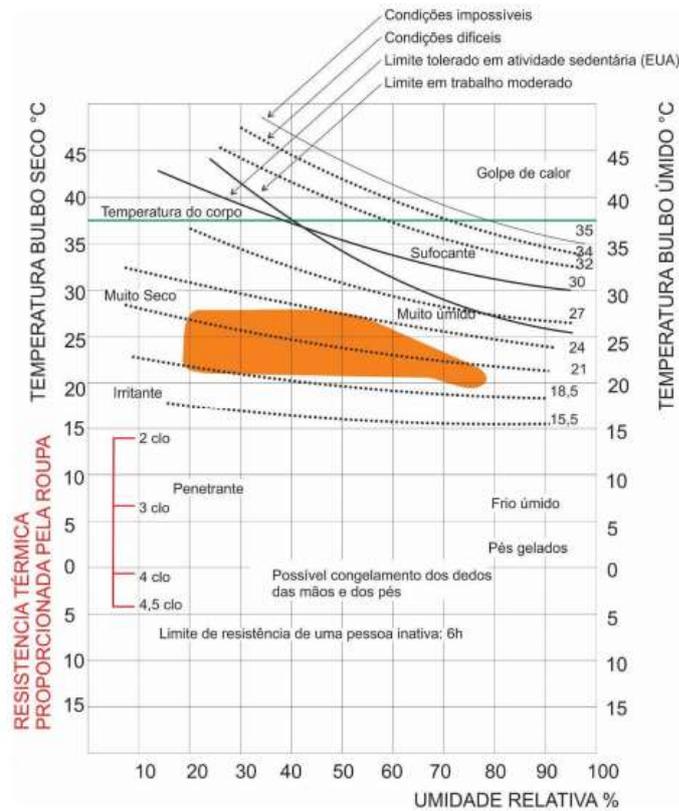
As estratégias de climatização natural são indicadas por inúmeros pesquisadores para que sejam utilizadas na criação de projetos mais sustentáveis.

Olgay (1963) indica as seguintes estratégias de climatização natural em sua carta bioclimática que relaciona temperatura do ar e umidade relativa:

- a) ventilação natural, indicando a velocidade do ar necessária para melhorar a sensação de satisfação;
- b) umidificação/evaporação, indicando a quantidade de vapor d'água a ser acrescentado ao ambiente para melhoria do conforto;
- c) ventilação, indicando as velocidades do ar, em m/s e o provável impacto para a sensação de resfriamento;
- d) insolação, abaixo de 21,1°C são indicados valores de radiação (Btu/h) para elevação da temperatura;
- e) vestimenta (clo) como alternativa para aquecimento.

Fagundes (2016, pag. 24) faz uma leitura dos gráficos de Olgay, adaptando da figura Izard e Guyot (1980) com as estratégias sugeridas, como mostra a Figura 4:

Figura 4- Estratégias de Olgay



Fonte: (FAGUNDES, 2016, pag. 24)

Olgay (1963) nos diz que é importante levarmos em conta algumas características para adaptarmos a zona de conforto aos trópicos:

- altitude – redução de 1°C para cada 187 m de altitude;
- latitude – considerar que o calor aumenta com a proximidade do equador;
- fatores topo-climáticos – diferenças de relevo e clima mostram que locais mais úmidos tem menores temperaturas que locais desérticos e que a proximidade do mar atenua o aumento da temperatura (LAMBERTS, 2014). Nestas situações é permitido uma variação do nível de conforto diminuindo ou acrescentando em 2,8°C a zona de conforto, ficando esta, entre 18°C a 29,5°C.

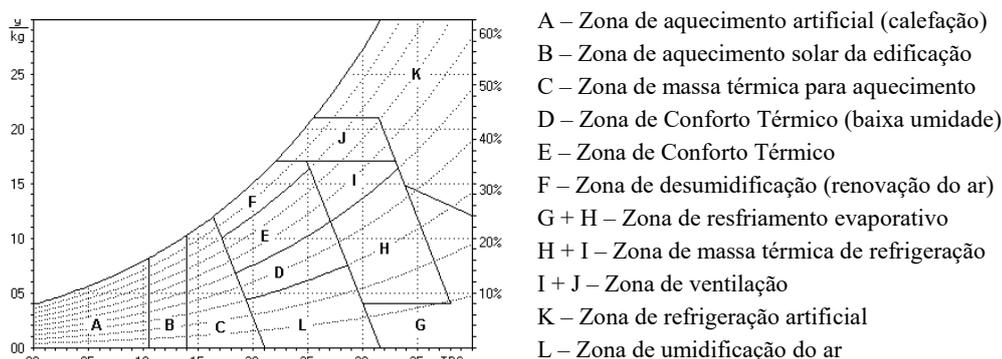
Nos trabalhos de Givoni (1992) ele também traz alternativas de melhoria do conforto térmico a partir de técnicas passivas de resfriamento, tanto para países desenvolvidos (clima temperado) como para países em desenvolvimento (clima quente). As estratégias sugeridas por ele são:

- ventilação durante o dia;

- b) inércia térmica com ou sem ventilação;
- c) resfriamento evaporativo direto;
- d) resfriamento evaporativo indireto (através de tanques no forro) (LAMBERTS, 2014, pag. 47).

Este modelo adapta-se com mais eficiência ao clima brasileiro. A NBR 15220 utiliza o trabalho de Givoni e ajusta sua carta bioclimática para a realidade do Brasil (ABNT, 2005, p. 2). O território brasileiro foi dividido em 6500 células, destas foram avaliados os dados climáticos de 330 cidades e as demais foram analisadas por interpolação. Após foram contabilizados os dados mensais de Temperatura Mínima, Temperatura Máxima e Umidade relativa, com estes dados delimitou-se as zonas por suas características climáticas e estratégias sugeridas para cada uma delas (Figura 5).

Figura 5 – Estratégias de climatização da NBR 15220



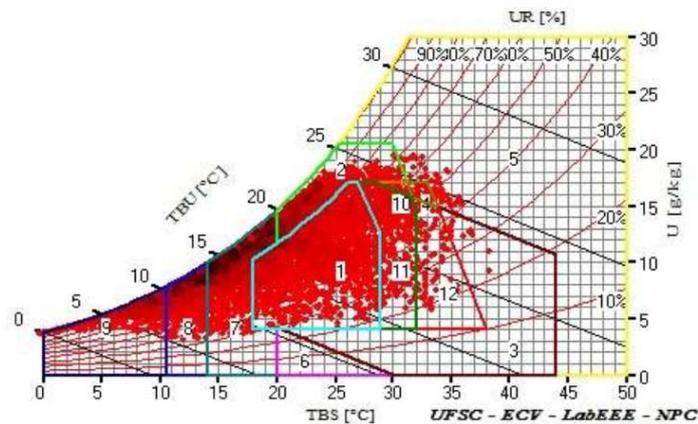
Fonte: (ABNT, 2005, p.14)

Flores (2014, p. 76), seguindo a os passos de Olgyay, Givoni e da NBR 15220, faz a construção de uma carta bioclimática para a cidade de Santa Maria, com o ano climático de referência utilizando o *software* AnalysisBio do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 6).

A pesquisadora (FLORES, 2014, p. 76), descreve as estratégias de resfriamento e aquecimento para a cidade de Santa Maria através do ano climático de referência (TRY):

- a) inércia térmica com aquecimento solar (29,4% do ano);
- b) aquecimento solar passivo (13% do ano);
- c) aquecimento artificial (8,86% do ano) para o inverno;
- d) ventilação natural (18,4% do ano) para o verão.

Figura 6 - Carta bioclimática de Santa Maria



Fonte: (FLORES, 2014, p. 76)

Nas indicações provenientes do ano meteorológico típico (TMY2), cita técnicas importante que podem ser estudadas para a aplicação neste trabalho:

(...) a ventilação natural, no verão, com a sugestão de que as edificações tenham suas fachadas de aberturas maiores direcionadas a leste e sudeste. Para o inverno, sugere-se o aquecimento solar/inércia térmica, que pode ser feita através de técnicas como a orientação solar adequada, a cor dos fechamentos, o emprego de painéis refletores externos e parede trombe. Ainda se destaca também o uso de isolamento térmico, com materiais como cortiça, isopor, lã de vidro e o concreto celular, os quais possuem capacidade de reduzir a transferência de calor e, com a inércia térmica advinda do calor retido nas paredes da edificação, podem auxiliar na climatização do ambiente nos horários mais frios (FLORES,2014, p.104).

Lamberts (2014, p. 91) afirma que o sombreamento é a melhor estratégia da arquitetura bioclimática para o Brasil, e que esta técnica deve ser utilizada sempre que a temperatura estiver acima dos 20°C, mesmo que a carta bioclimática indicar conforto térmico. Flores (2014, p. 41) cita a indicação de sombreamento quando fala sobre o zoneamento bioclimático brasileiro. Quando se analisa as técnicas de sombreamento em prédios educacionais, é necessário que seja mantida a qualidade da iluminação natural. Estas duas características estão intimamente associadas. Estas indicações mostram ser imprescindível somar as estratégias analisadas o sombreamento e iluminação natural como alternativa para a climatização natural de ambientes.

A cidade de Cachoeira do Sul está situada na mesma zona bioclimática de Santa Maria e possui características climáticas equivalentes, portanto as técnicas indicadas para a esta, foram utilizadas neste trabalho.

Nas seções seguintes serão apresentadas algumas características de cada uma destas estratégias.

2.3.1 Ventilação natural

A ventilação natural é uma estratégia de resfriamento de ambientes e de controle da qualidade do ar interior. A circulação de ar auxilia na evaporação da transpiração resultante de temperaturas elevadas trazendo uma sensação de conforto térmico ao ser humano. Segundo Givoni (1992, p. 87) “em todas as regiões climáticas do mundo, há momentos em que a temperatura exterior é agradável e a ventilação natural pode ser a maneira mais simples e efetiva de proporcionar conforto interno”. Entre as várias estratégias de ventilação natural serão estudadas das técnicas de ventilação cruzada, dutos enterrados e chaminés solares.

2.3.1.1 Ventilação cruzada

A ventilação cruzada é um método de resfriamento dos edifícios que se baseia no correto direcionamento e dimensionamento das aberturas para que seja possível remover o calor do interior dos recintos para áreas externas. As variáveis que influenciam no resfriamento do ambiente na utilização da ventilação cruzada são: a direção do vento, a velocidade do vento, o tamanho das aberturas e a diferença de temperatura do ar externo e do interior. Um fator que atua sobre a temperatura, e que pode comprometer o resfriamento é a umidade relativa do ar. Se esta estiver muito elevada, diminuirá a evaporação dificultando transpiração e a diminuição do calor na pele (KWOK; GRONDZIK, 2013, p. 165).

Brown e Dekay (2004, p. 205) afirmam que este tipo de ventilação é mais eficaz quando as “entradas-de-ar são localizadas na área de alta pressão (no lado que recebe os ventos) e as saídas de ar na área de sucção (lado oposto)”. Esses autores também afirmam que quando o vento for perpendicular as aberturas de entrada e estas possuírem grandes dimensões, pode-se atingir a máxima ventilação do recinto.

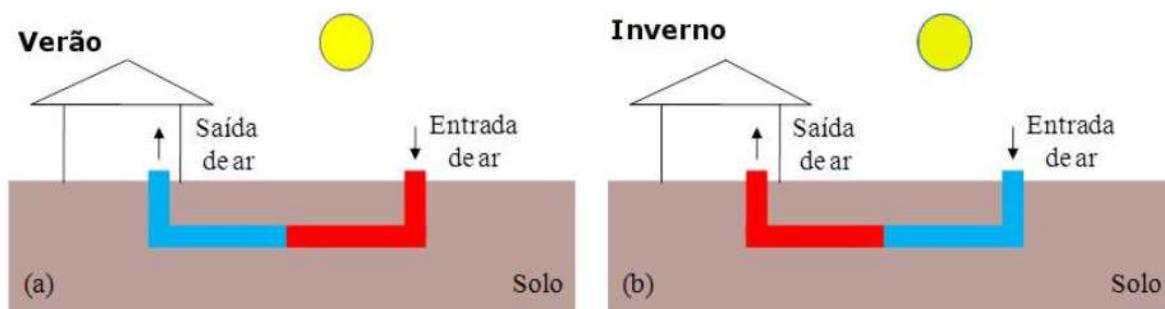
Quanto ao dimensionamento das aberturas é indicado que a entrada e a saída do ar possuam as mesmas dimensões, isso se verifica pelas tabelas constantes nos trabalhos de Brown e Dekay (2004, p. 205) e Kwok e Grondzik (2013, p. 168).

2.3.1.2 Dutos enterrados

Os dutos enterrados têm várias nomenclaturas. Chamados de trocadores de calor solo-ar (TCSA) por Brum (2016, p. 2), sistema de climatização por dutos subterrâneos (SCDS) por

Alves (2014, p. 16), dutos subterrâneos por Cunha et al. (2004, p. 89) e dutos enterrados por Camargo (2017). Esse sistema de ventilação tem o objetivo de melhorar a temperatura do ambiente interno das edificações por meio da troca de calor efetuada entre o solo e o ar que passa pela tubulação (Figura 7). “Em virtude da defasagem entre as temperaturas do ar e das camadas superficiais da Terra, é possível resfriar o ar no verão e aquecê-lo no inverno” (BRUM, 2016, p. 1).

Figura 7 - Esquema de funcionamento dos dutos enterrados



Fonte: (BRUM, 2016, p.2).

Alves (2014, p. 76) relata que as cidades mais frias do Brasil estão localizadas nas Zonas Bioclimáticas 1 e 2. Como exemplo dessas zonas, Curitiba e Santa Maria, com médias “de temperatura anual de 17,3 °C e 19 °C, respectivamente, tem maior necessidade de graus-hora anuais de aquecimento, ao mesmo tempo em que apresentam potencial de climatização significativo para suprir esta demanda energética”. Seus estudos mostram que a necessidade de resfriamento nesta região é de 2564,9 graus-hora, que a capacidade de resfriamento do solo em 0,5m de profundidade é de 2192,6 graus-hora, representando 85,5% da demanda, e que a 4m de profundidade o potencial de resfriamento amplia-se para 2564,9 graus-hora chegando a 100% da necessidade.

Camargo (2017) faz uma análise do desempenho de Dutos subterrâneos em uma residência em Santa Maria – RS. A pesquisa relaciona a profundidade, comprimento e diâmetro da tubulação relacionando com graus-hora de resfriamento e com o conforto térmico proporcionado. A pesquisadora afirma que aumentando o diâmetro amplia-se a superfície de contato do tubo com o solo, porém acarreta uma diminuição da eficiência proporcionalmente ao aumento da seção. Sobre o comprimento da tubulação, relata que é um parâmetro que gera maiores índices de conforto e que o acréscimo no comprimento se mostra mais eficaz do que

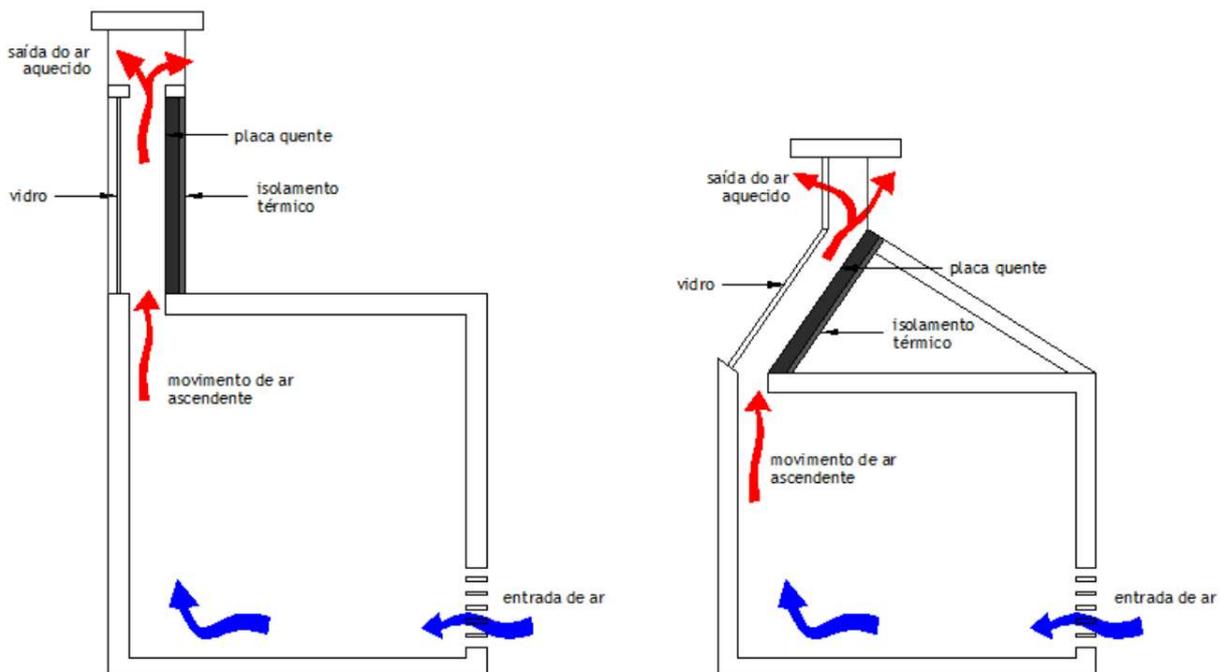
ampliar a profundidade. Por fim, ao considerar “as questões econômicas para a implantação do sistema, o aterramento do duto a uma profundidade de 4,5 metros não demonstra uma medida compensatória, pois os ganhos são mínimos quando equiparados à profundidade de 3,0 metros” (CAMARGO, 2017, p. 91).

2.3.1.3 Chaminé solar

O ar varia a densidade conforme a sua temperatura. Quando mais quente ele é, menos denso se torna e tem a tendência a subir, já o ar mais frio tem a tendência de descer. Brown e Dekay (2004, p, 208) explicam que “em um recinto resfriado pela ventilação por efeito chaminé, o ar quente sobe e sai através de aberturas existentes na parte superior do recinto, sendo substituído por um ar de temperatura inferior que entra pela parte inferior”.

Neves e Silva (2017, p. 164) descrevem a chaminé solar como um elemento arquitetônico que através do aquecimento do sol, na ponteira da chaminé, força o ar quente a subir por causa da diferença de temperatura e pressão entre a entrada e a saída do ar. Os autores salientam que esta estratégia arquitetônica tem maior eficiência com a “incorporação de um coletor solar com uma face externa em vidro, um canal de ar, uma placa negra absorvedora e uma camada de isolante térmico em suas laterais e base” (Figura 8).

Figura 8 - Esquema de funcionamento das chaminés de ventilação



Fonte: (NEVES, 2012, p. 8)

2.3.1.4 *Cálculo de vazão entre chaminé solar e dutos enterrados*

Os dutos enterrados e chaminés solares ao serem utilizados conjuntamente em um recinto geram uma circulação de ar para refrigeração. Este processo resulta na injeção de ar resfriado do duto enterrado e a expulsão do ar quente pela chaminé solar, resultando em uma troca benéfica ao resfriamento da edificação.

A verificação da vazão volumétrica que passa pelo recinto, bem como o número de renovações de ar no recinto pode ser obtida por cálculos matemáticos. Vários autores citam formas de cálculo para que estas variáveis sejam encontradas, entre eles Cavalcanti (2010), Neves (2012), Christmann (2015) e Camargo (2017).

Basicamente os procedimentos de cálculo se alicerçam nos seguintes parâmetros:

- a) cálculo da taxa de transferência de calor entre o solo e o ar ao passar nos dutos enterrados;
- b) cálculo da temperatura do ar na saída do duto enterrado;
- c) cálculo da perda de carga e da queda de pressão no duto enterrado;
- d) cálculo da velocidade média do ar no recinto;
- e) cálculo da vazão volumétrica do ar que entra no recinto;
- f) cálculo do tempo de permanência do ar na sala;
- g) cálculo das renovações de ar no recinto;
- h) cálculo da velocidade média do ar na chaminé solar;
- i) cálculo do ganho de energia por radiação na ponteira da chaminé solar;
- j) cálculo da perda de carga e da queda de pressão na chaminé solar.

Estes procedimentos levam em consideração alguns dados iniciais, como características dos dutos (tipo de material, rugosidade, espessura da parede, condutividade térmica, etc.), propriedades do ar (coeficiente convectivo, etc.), radiação solar (média mensal), temperatura ambiente (média mensal), dentre outros.

2.3.2 Sombreamento e iluminação natural

A incidência de luz solar nos ambientes de forma geral é desejada em todos os projetos. A quantidade de radiação solar que chega ao interior dos edifícios e a forma como ela adentra os recintos é que fazem com que esta estratégia de projeto possa melhorar ou prejudicar o conforto térmico.

Fernandes (2016, P.15) relata a necessidade de conforto visual nos ambientes e da importância das escolhas do usuário:

No contexto da iluminação, os espaços são (ou deveriam ser) projetados para o desempenho e conforto visual, uma vez que a satisfação do usuário influenciará o seu comportamento, produtividade e bem-estar físico e emocional. Por outro lado, o usuário tem papel fundamental na avaliação dos espaços, e segundo suas preferências, demonstradas por atitudes simples e sua interação com o ambiente (abrir ou fechar persianas, acender e apagar luzes, mudar de posição, etc.), este busca sempre situações mais confortáveis para desenvolver a sua tarefa (trabalhar, repousar, contemplar).

Para Mansilha (2013, p.25) o conforto visual é atingido especialmente pela iluminação natural. Brown e Dekay (2004, p.50) descrevem que a iluminação natural é influenciada diretamente pela condição do céu, classificado como encoberto, claro ou parcialmente nublado. A variação e qualidade da iluminação assim como a quantidade irradiada que chega ao solo dependem também da latitude, do relevo próximo, o entorno construído e da época do ano.

Para o emprego de estratégias bioclimáticas que contribuam para o equilíbrio térmico dos recintos permitindo uma iluminação com qualidade analisou-se o emprego de brises, de estantes de luz e do sombreamento com vegetação.

2.3.2.1 *Brisas*

O *brise soleil* é um componente arquitetônico incorporado nas fachadas das edificações que tem por finalidade proteger o seu interior da incidência da radiação solar direta.

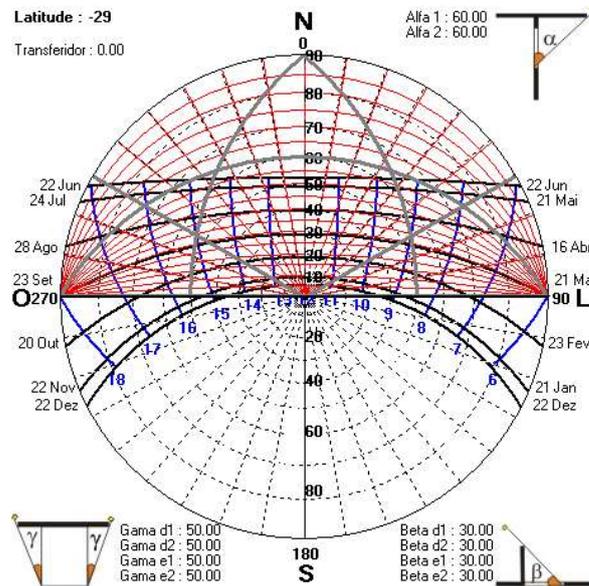
Segundo Scherer (2014, p. 52): “O *brise soleil* é caracterizado como um elemento externo à edificação, composto por uma ou mais lâminas horizontais, verticais ou combinadas, o que admite infundáveis composições. Ainda, estas lâminas podem ser fixas ou móveis”.

O dimensionamento dos brises é feito através da carta solar onde são sobrepostas máscaras de sombreamento que indicam a área em que a abóboda celeste necessita ser obstruída para o correto posicionamento das aletas do brise.

O programa SOL-AR (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2013) é uma ferramenta disponível pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina “que permite a obtenção da carta solar da latitude especificada, auxiliando no projeto de proteções solares através da visualização gráfica dos ângulos de projeção desejados sobre transferidor de ângulos, que pode ser plotado para qualquer ângulo de orientação” (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA,

2018) (Figura 9).

Figura 9 - Exemplo de carta solar produzida pelo programa Analysis Sol-Ar

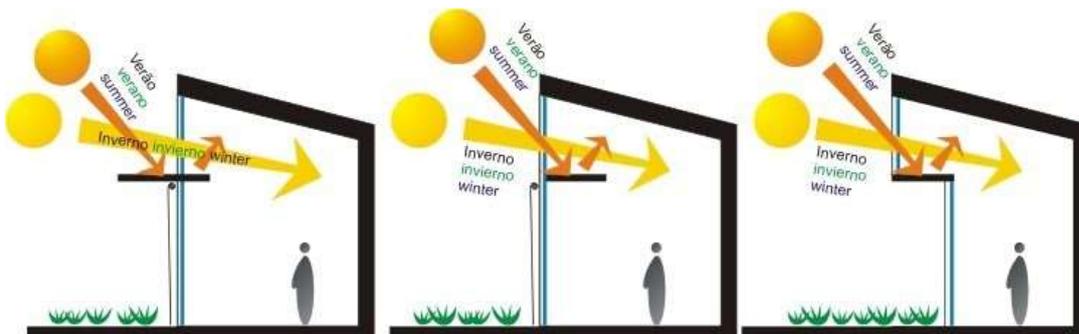


Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

2.3.2.2 Estantes de luz

As estantes de luz são compostas por um elemento horizontal que secciona as aberturas a uma altura planejada para que a superfície proteja o usuário que está próximo a janela da incidência direta da radiação solar. A parte superior da plataforma, que está diretamente voltada para o sol, refletirá a luz solar para o interior do recinto permitindo uma melhor iluminação nos pontos mais profundos do recinto. “Esta estratégia combina o aquecimento por ganhos diretos e indiretos e, adicionalmente, otimiza a iluminação natural por radiação indireta” (CUNHA et al., 2004, p. 78) (Figura 10).

Figura 10 - Esquemas das prateleiras de luz



Fonte: (BIOCLIMÁTICAA&D, 2017)

2.3.2.3 Sombreamento com vegetação

Os elementos de sombreamento com vegetação (Figura 11) além de diminuir a incidência da radiação solar sobre a envoltória do edifício, trazem benefícios estéticos e psicológicos que justificam a utilização do verde, pois aumentam o contato do homem com a natureza (SCHERER; FEDRIZZI, 2014).

Figura 11 - Exemplo de sombreamento com vegetação



Fonte: (UIAARCHITECTES, 2017)

Utilizar a vegetação para produzir sombra sobre um edifício tem várias particularidades pois trata-se um elemento vivo, dinâmico, que está submetido a alterações durante seu crescimento, variações sazonais, ação do vento ou por causas adversas como a interferência humana, mudanças climáticas ou adaptabilidade. Cada espécie tem características próprias que podem alterar o efeito do sombreamento, além das condições de plantio, adubação e irrigação (SCHERER, 2014, p. 26).

Scherer (2014) analisou o sombreamento da vegetação produzido por cortinas verdes nas fachadas de edifícios. Em sua tese ela definiu o Percentual de Transmissão Solar (PTS) que é a porcentagem de luz que determinada vegetação deixa passar quando utilizada como elemento de sombreamento. Na Tabela 1 encontra-se os índices de PTS para as quatro espécies estudadas pela pesquisadora.

Tabela 1 - Valores de PTS para cada espécie em cada mês do ano.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<i>Wisteria floribunda</i>	0,05	0,05	0,04	0,04	0,06	0,78	0,86	0,84	0,38	0,10	0,08	0,07
<i>Campsis grandiflora</i>	0,57	0,58	0,82	0,86	0,87	0,93	0,94	0,93	0,34	0,07	0,07	0,30
<i>Lonicera japonica</i>	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
<i>Trachelospermum jasminoide</i>	0,50	0,46	0,44	0,47	0,48	0,45	0,49	0,48	0,51	0,42	0,50	0,48

Fonte: (SCHERER, 2014, p. 127)

2.3.3 Inércia térmica

O conforto térmico dentro de uma edificação está diretamente ligado à qualidade do envelope construtivo. A envoltória da edificação é o elemento que protege o interior.

De acordo com Flores (2014), entre as alternativas técnicas para melhorar o conforto térmico da envoltória na zona bioclimática 2, encontra-se a utilização de materiais com alta inércia térmica.

Para Lamberts, Dutra e Pereira (2014, p. 197) a inércia térmica é a capacidade do material armazenar uma parte do calor que está passando por ele, quanto maior a inércia térmica maior a capacidade de reter o calor. Nas investigações de Dorneles (2004, p. 129), uma das conclusões para o uso da inércia térmica em São Carlos que apresenta verões quentes e úmidos, é descrita abaixo:

Nos meses mais quentes, a elevada inércia térmica reduz as oscilações das temperaturas internas e diminui os valores de temperaturas máximas no interior dos ambientes. Para otimizar o desempenho térmico de edificações com alta inércia térmica, o sombreamento de fachadas e aberturas, durante esses períodos, reduz os ganhos de calor interno. A ventilação seletiva também é fundamental nos meses de maior desconforto por calor. [...] Durante o dia, quando a temperatura externa é superior a interna, deve-se evitar as trocas de ar com o exterior, para que o ar interno não se aqueça rapidamente. Estas estratégias ajudam a minimizar o desconforto por calor e a necessidade de refrigeração artificial.

Os resultados da pesquisa de Papst (1999, p. 160) mostraram que entre as residências estudadas para a cidade de Florianópolis, com clima quente e úmido no verão, a que possuía a maior inércia térmica e que tinha boa orientação solar, apresentava os melhores resultados durante todo o período analisado. O estudo também conclui que a utilização da inércia térmica sempre mostra bons resultados, em especial quando integrado ao uso de isolamento na

cobertura. A inércia térmica evita o armazenamento de calor por radiação nas horas mais quentes e dificulta a perda de calor do interior do prédio no período frio.

A inércia térmica é uma estratégia de fácil aplicação em escolas, com a simples troca do sistema de vedação mais comum de tijolos furados por tijolos maciços. Esta mudança aumenta o atraso térmico e o amortecimento térmico, principais características na utilização da inércia térmica (DORNELLES; RORIZ, 2003).

2.3.4 Isolamento Térmico

Isolantes térmicos são materiais com características físicas que lhes atribuem a capacidade de dificultar as trocas de calor entre o exterior e o interior dos ambientes. Esses materiais apresentam baixa difusividade térmica, baixa condutividade térmica, baixa densidade volumétrica e calor específico alto (MENDES, 2012). Segundo Kwok e Grondzik (2013, p. 29 e 39), esses materiais são vitais para o controle do clima no projeto de edificações, contribuindo para a redução no consumo de energia.

Os isolantes podem ser aplicados de três formas: com o material isolante dentro do envelope externo, com o material isolante aplicado na superfície do envelope e com o material isolante integrado a estrutura sem emolduração (BROWN; DEKAY, 2004, p. 237).

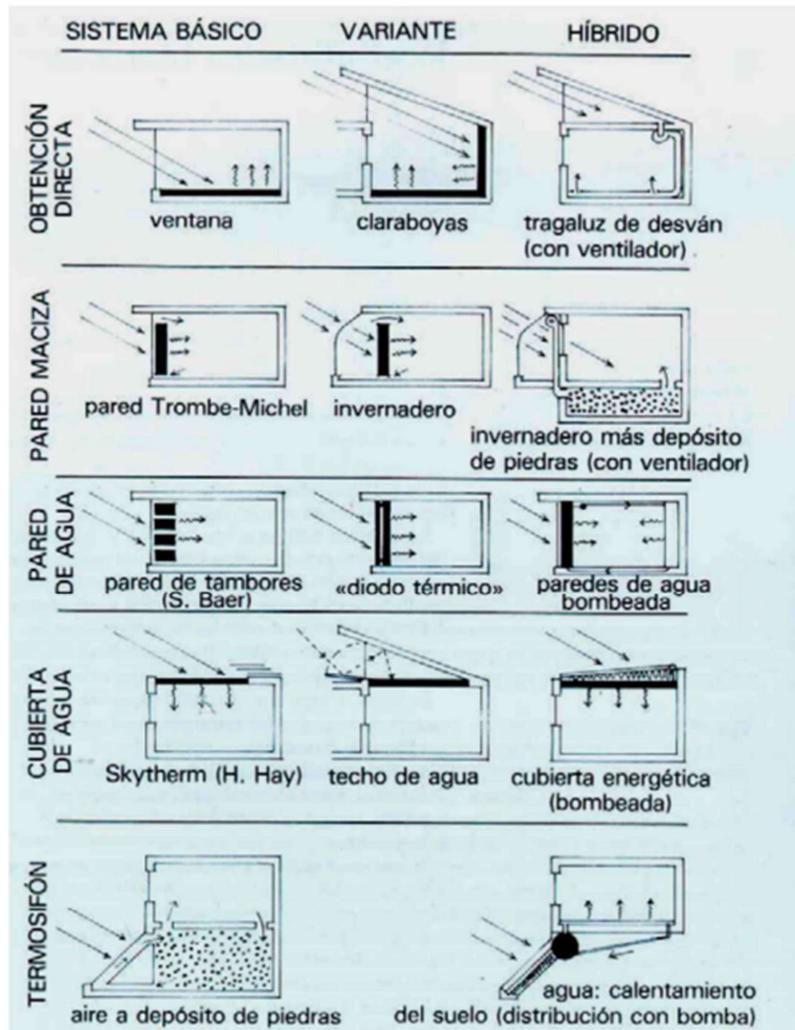
Os materiais mais conhecidos para isolamento térmico nas edificações no Brasil são: lã de rocha, lã de vidro e EPS. Eles são normalmente aplicados atrás de uma parede ou forro de gesso.

2.3.5 Aquecimento solar passivo

O aquecimento solar passivo tem como características capturar radiação solar e transformá-la em calor, armazená-lo e disponibilizá-lo no momento em que for preciso. Esse processo deve ocorrer de forma natural, somente com a energia provinda do sol (FRANDOLOSO, 2001, p. 119).

Cunha (et al., 2004, p.48) e Frandoloso (2001, p. 119) utilizam a mesma classificação de Szokolay (1983) de cinco técnicas de aquecimento solar passivo como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Técnicas de aquecimento solar passivo

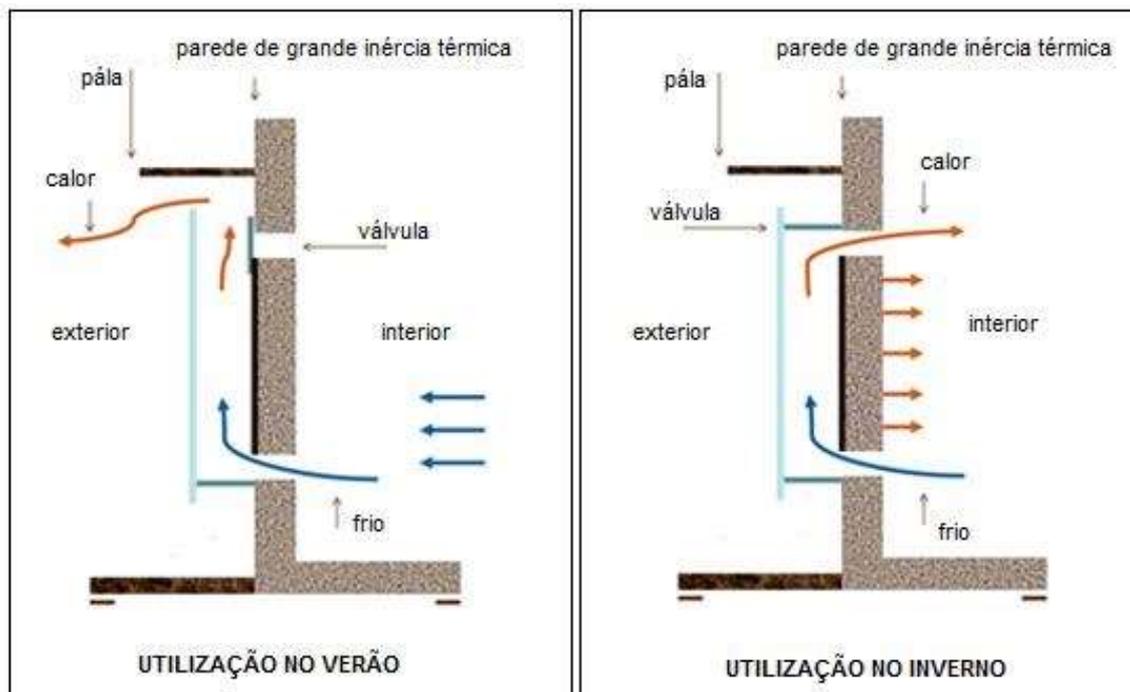


Fonte: (CUNHA org., 2004, p. 48)

2.3.5.1 Parede trombe

A técnica consiste na captação do calor por meio de uma parede translúcida e na armazenagem desta energia em uma parede de grande inércia térmica que passa o calor para o interior do recinto por condução. O processo é auxiliado por um sistema de ventilação por termosifão, formado por uma abertura inferior e outra superior. O sistema é regulado por uma válvula no topo que permite a saída do calor nos períodos quentes e o armazenamento deste nos dias frios (Figura 13).

Figura 13- Esquema de uma parede trombe.



Fonte: (ASTROREI, 2017)

A importância do vidro no aquecimento do ar interno da parede trombe é fundamental como explica Vettorazzi, Russi e Santos (2010, p. 4):

A função da trombe é a captação e acumulação da energia solar. A radiação solar de onda curta atravessa os vidros e aquece o muro, produzindo o chamado “efeito estufa”. Quando a radiação de onda longa é emitida pelo muro, não pode voltar a atravessar os vidros, aquecendo o ar que há na caixa de ar e acumulando calor no muro. O ar que passa no espaço entre o vidro e a parede pode ser conduzido por dutos aos ambientes ou eliminado com a abertura das esquadrias superiores.

A interação da parede trombe com o sombreamento com vegetação caducifólia em uma parede oeste resulta em um melhor aquecimento nos meses de inverno e resfriamento no verão.

2.3.5.2 Parede de vidro

As paredes de vidro podem ser utilizadas para aquecer os recintos nas edificações. Nos climas subtropicais, em especial na zona bioclimática 2 do Brasil, onde o verão é quente e o

inverno frio, os vidros podem ser utilizados para aquecer ou resfriar os ambientes conforme a necessidade do projeto.

Santos (2002) explica a diferença entre vidro absorvente e vidro refletivo: o primeiro está relacionado com a parcela de radiação que fica no recinto pois a maior parte dela é absorvida, já o segundo reflete a maior parte da radiação solar que incide sobre o mesmo.

Quando a energia incidente é absorvida pelo elemento, eleva sua temperatura, sendo uma grande parcela reirradiada para o interior, causando desconforto nas pessoas próximas e elevando a carga térmica do recinto. Já quando a energia é refletida é completamente excluída do interior do edifício, sendo esse processo mais eficiente na eliminação do calor (SANTOS, 2002, p.73).

Como vimos anteriormente Flores (2014 p. 76), alicerçada nos estudos de Givone (1992), indica o aquecimento solar passivo para 8,86% do ano em Santa Maria. Os testes de eficiência destas técnicas podem ser feitos em locais do edifício voltados em sua maior dimensão para sul, fator que acarreta o resfriamento do ambiente.

2.3.6 Absortância Solar

Segundo a Norma 15220 (ABNT, 2005a, p. 3), a absortância à radiação solar é o “quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”. A absortância solar está diretamente ligada a cor da superfície. Os revestimentos utilizados nos fechamentos opacos podem absorver mais calor conforme a absortância solar inerente a sua cor.

Os dois locais expostos a radiação solar, com influência da absortância, são a cobertura e os fechamentos opacos verticais. Nestes planos cabe ao projetista especificar materiais de baixa absortância em climas que necessitam maior número de horas de resfriamento e o inverso em climas mais frios.

A argamassa de cimento e areia é um dos revestimentos mais utilizados nas fachadas das edificações pelo baixo custo dos materiais que os compõe. Este tipo de revestimento necessita de pintura em seu acabamento e a escolha da cor da tinta influencia diretamente na absortância solar. Dornelles (2007, p. 11) relata que “como a escolha da cor da tinta não envolve custo extra, uma tinta refletiva externa é a característica arquitetônica de controle climático mais eficaz e a maneira mais viável de minimizar as cargas térmicas das edificações”.

2.4 ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA EM AMBIENTES ESCOLARES

Construir espaços escolares com baixo gasto de energia e que sejam confortáveis é imperativo para a melhoria do ensino. Não há dúvidas que um aluno estudando em um local projetado para ter conforto térmico, terá mais facilidade de aprendizado, pois a energia despendida para que se mantenha em neutralidade térmica pode ser direcionada para o raciocínio. As diretrizes do Fórum Nacional de Educação (BRASIL, 2014), tem como meta que as construções escolares do Brasil atendam requisitos de sustentabilidade, respeitando as expectativas das comunidades locais e reforçando a cidadania.

Em um prédio de salas de aula de uma universidade, com cursos de engenharias e arquitetura, que tem por finalidade ensinar a boa técnica e inovações sustentáveis, deve-se primar pela aplicação de técnicas de condicionamento natural, evitando o desperdício de energia e capacitando seus alunos em espaços que sirvam de exemplo.

As estratégias de climatização natural, neste tipo de edificação, podem formar projetistas mais conscientes, além de diminuir imediatamente o custo mensal da unidade de ensino. A dependência do ar condicionado gera gastos desnecessários e ainda diminui a amplitude térmica aceitável pelo indivíduo. O trabalho de De Vecchi, (2011, p. 99) avaliou a ventilação natural em escolas de Florianópolis. Ela conclui que existe um vício em relação ao uso dos condicionadores de ar por parte dos alunos analisados: “além do vício à climatização artificial, estes usuários demonstraram pouca tolerância com relação às flutuações de temperatura, além de menor aceitabilidade térmica quando comparada à aceitabilidade dos usuários sem exposição prévia ao ambiente climatizado”.

Um estudo realizado na sede do Campus do Sertão da Universidade Federal de Alagoas sobre a utilização de estratégias de climatização relacionadas ao conforto hidrotérmico concluiu que “o efeito chaminé aliado ao uso de alvenaria dupla com aplicação de poliestireno expandido contribuem, respectivamente, para o condicionamento passivo e amortecimento térmico dos ambientes” (SANTOS; COSTA; BARROS, 2014, p. 865). Salienta que a falta de estratégias de resfriamento evaporativo, ventilação seletiva e de sombreamento para melhorar o conforto da edificação.

Rackes, et. al. (2015) entende que a padronização dos projetos, motivada pela diminuição dos custos, é comum em vários setores do governo entre eles educação, saúde e habitação. Nota-se, entretanto, que projetos idênticos para situações climáticas diferentes, não favorecem o aproveitamento de estratégias bioclimáticas, principalmente em relação a orientação mais favorável e a direção dos ventos predominantes. A escolha de materiais

adequados à região influencia diretamente na economia e no conforto ambiental dos edifícios que não deveriam ser iguais em suas propriedades térmicas ou nas características das aberturas, como área e tipo de vidro (RACKES et. al. 2015, p. 2).

Baixar os custos de projeto não significa ter economia na edificação. Diminuir o consumo de energia nas escolas passa pela diminuição do custo com refrigeração e aquecimento. Nesse sentido, as técnicas bioclimáticas aplicadas nos projetos escolares vem ao encontro deste objetivo.

2.5 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

A simulação computacional para análise térmica de edificações proporciona a verificação do comportamento térmico, da eficiência energética e do conforto térmico. É uma ferramenta que se tornou uma alternativa viável com a evolução dos computadores e *softwares*, mas no momento está acessível quase que unicamente a grupos de pesquisa de pequeno e médio portes, inseridos em universidades. Esses programas ainda não estão consolidados como ferramenta de projeto nos escritórios de arquitetura e engenharia, somente grandes empresas de projeto conseguem uma equipe interdisciplinar capaz de trabalhar com toda a informação que eles podem oferecer (TRINDADE, PEDRINI; DUARTE, 2005, p. 1).

O programa mais utilizado para a simulação computacional nas avaliações termo-energéticas de edificação é o EnergyPlus. Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, ele “tem como objetivo principal estimar trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento” (LAMBERTS, 2010, p. 15). Com as últimas versões é possível simular a ventilação natural, o uso da água, sistemas fotovoltaicos e índices de conforto térmico.

A configuração do EnergyPlus inicia com a modelagem da edificação em estudo no programa Sketchup Make 2017, com o *plugin* Euclid 0.9.3. Para tanto é preciso entender o conceito de zonas térmicas. Essas são divisões realizadas no edifício, separando as áreas que fazem as mesmas trocas térmicas, internas e externas.

Ao término da modelagem, passa-se para a inserção de dados no EnergyPlus, com a inclusão do arquivo climático que caracteriza o sítio.

Os próximos dados adicionados ao arquivo são os que designam os algoritmos a serem utilizados e os dados de localização do sítio. Logo após é feita a configuração do calendário com a indicação dos feriados e dos dias típicos de inverno e verão. Depois são feitas as agendas

de ocupação, atividade, iluminação, equipamentos e agendas para as estratégias estudadas. A identificação dos materiais da edificação é realizada em duas etapas: primeiro a enumeração dos materiais e depois das composições formadas por eles. Conforme os materiais utilizados em cada projeto, pode ser necessário calcular uma parede equivalente a parede real. O programa entende as trocas térmicas somente no sentido horizontal quando paredes e vertical quando coberturas, devendo ser os materiais da composição colocados lado a lado com as características físicas equivalentes a parede real. Também são registradas as características físicas dos materiais de construção nesta etapa do processo (GARLET; SOARES, 2018).

A ventilação natural é configurada através de quatro comandos do programa: *Airflow Network: Simulation Control*, que indica os controles utilizados pela simulação, *Airflow Network: MultiZone: Zone*, com as características de cada zona que será simulada com a ventilação natural, *Airflow Network: MultiZone: Surface* que caracteriza cada uma das aberturas do projeto, indicando entre outras características, a percentagem de abertura de cada esquadria e as agendas que regulam sua abertura, por último, *Airflow Network: MultiZone: Component: Simple Opening* que caracteriza as tipologias de aberturas utilizadas no projeto a ser simulado (PEREIRA, et. al., 2013).

O seguinte procedimento é calcular a temperatura do solo através do pré-processador *Slab*, utilizado para edificações em contato direto com o solo. O *Slab* gera as médias das temperaturas do solo para cada mês do ano correspondentes a edificação estudada (CAMARGO, 2017, p. 68).

Costa (2017, p. 156) indica o uso do pré-processador *Slab* por ser mais fiel aos resultados de conforto dos prédios simulados:

O impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo indicou que, não usar o *Slab* gera uma diferença muito significativa na avaliação do desempenho. O uso de outras opções de modelagem no EnergyPlus (EP), como os objetos *Site:Ground Temperature: Building surface* (GT:BSurface) e o *Site: Ground Domain* (GDomain), causaram um grande impacto nos graus-hora de desconforto totais, de -26,2% e de -55,2%, respectivamente, em relação ao observado com o uso do *Slab*.

A última etapa é a análise de resultados, onde podem ser avaliados o consumo de energia, o nível de conforto térmico, a ventilação natural, renovação de ar, fluxos térmicos, entre outras. É importante compreender como ajustar a saída de resultados do programa, que por não ter uma interface de fácil interpretação, precisa-se de conhecimento específico para avaliá-lo.

3 METODOLOGIA

A metodologia descrita a seguir é o processo que foi utilizado para atingir os objetivos almejados e chegar às conclusões sobre aplicação das técnicas de climatização natural e a sua influência no conforto térmico de um prédio de salas de aula da UFSM no campus de Cachoeira do Sul, na Zona Bioclimática 2.

As avaliações foram feitas através de simulações termo energéticas com a utilização do *software* EnergyPlus na versão 8.7, juntamente com o Sketchup Make 2017 que auxilia na modelagem das zonas térmicas. Para a interação destes dois *softwares* foi usado o *plugin* Euclid 0.9.3.

O arquivo climático utilizado para as simulações foi o da cidade de Santa Maria – RS, BRA_Santa.Maria.838360_SWERA.epw (FLORES, 2014), visto que ainda não existe arquivo climático para a cidade de Cachoeira do Sul. As condições de relevo e clima de Cachoeira do Sul são muito semelhantes com as da cidade de Santa Maria, que está na mesma zona climática e localiza-se na região central do estado do Rio Grande do Sul, distantes 120 Km uma da outra (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados de localização e clima (médias anuais)

Cidade	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Temperatura média	Umidade relativa	Precipitação	Altitude	Latitude	Longitude	Código da estação
Cachoeira do Sul	25,1	14,2	19,1	74,7	1477,1	*68	-30,03	-52,88	83963
Santa Maria	24,9	14,3	18,8	76,5	1616,8	103	-29,7	-53,7	83936

Fonte: (INMET,2018).

A primeira etapa realizada foi avaliar o comportamento térmico da edificação, obtendo os fluxos térmicos, o percentual de conforto térmico, desconforto por frio e desconforto por calor das zonas térmicas detectadas no projeto original ao longo do ano. A avaliação do conforto térmico foi embasada na norma americana ASHRAE 55 (2013).

A segunda etapa foi avaliar a eficácia de estratégias de climatização natural que poderiam ser inseridas no projeto visando a melhoria das condições de conforto térmico. Esta etapa foi dividida em duas partes. Inicialmente foi feita a avaliação de estratégias de climatização natural onde o EnergyPlus simula o cálculo da ventilação natural com os dados do arquivo climático. Depois foram avaliadas as estratégias de climatização natural nas quais o programa necessita que a quantificação das renovações de ar seja indicada.

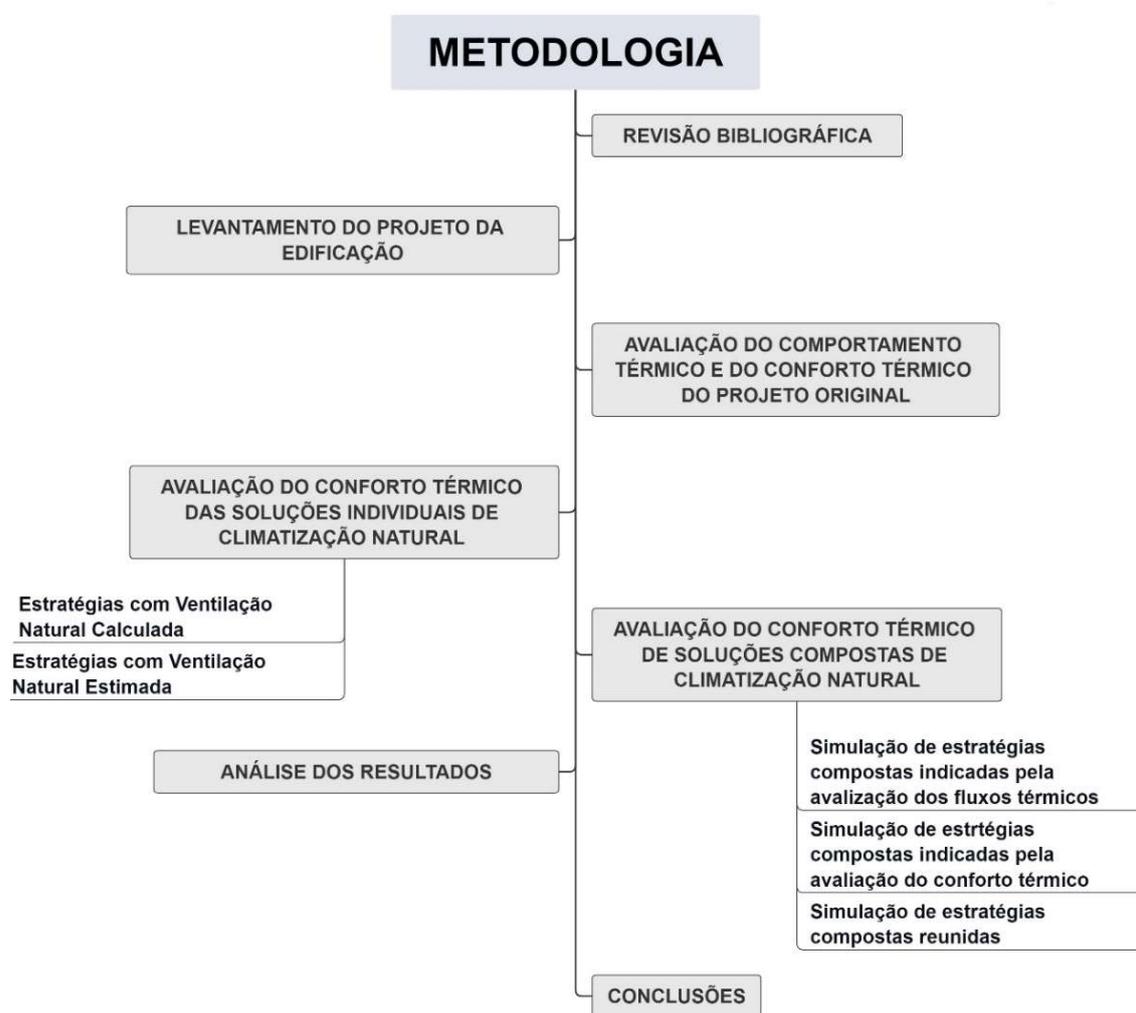
Na terceira etapa do processo realizaram-se simulações onde foram agregadas mais de

uma das estratégias estudadas. Foram três as formas de seleção destas composições:

- selecionadas através da análise dos fluxos térmicos do prédio original;
- selecionadas através da análise do conforto térmico de cada estratégia;
- selecionadas através da análise dos fluxos térmicos do prédio original em conjunto com as de conforto térmico de cada estratégia.

A metodologia proposta será um processo linear como pode ser visto na Figura 16.

Figura 14 - Esquema Metodológico



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

3.1 LEVANTAMENTO DO PROJETO DA EDIFICAÇÃO

Nesta etapa foram levantados os dados referentes ao projeto arquitetônico da edificação, materiais utilizados e o número de usuários que serão mostrados nesta seção para a melhor

compreensão da metodologia nas seções seguintes.

3.1.1 Projeto do prédio de salas de aula da UFSM-CS

O Campus da Universidade Federal de Santa Maria em Cachoeira do Sul (UFSM-CS) foi oficializado em 19 de dezembro de 2013, através da Resolução nº038/2013 do Conselho Superior da instituição (Consu) e iniciou suas atividades acadêmicas dia 11 de agosto de 2014 com cinco cursos de graduação: Arquitetura e Urbanismo; Engenharia Agrícola; Engenharia Elétrica; Engenharia Mecânica; e Engenharia de Transportes e Logística.

O município está localizado, no sul do Brasil, na região centro ocidental do Rio Grande do Sul, na Zona Bioclimática 2 e inserido na unidade de relevo do estado denominada depressão central. O clima da região, segundo a classificação de Köppen (KUINCHTNER; BURIOL, 2016) é “subtropical úmido, sem período seco, com a temperatura média anual de 19,2°C, sendo a média do mês mais quente superior a 24°C e a média do mês mais frio em torno de 13°C, com precipitação (anual) de 1.594 mm” (LINDENMAIER; BUDKE, 2006 apud. IPAGRO, 1982). Possui uma grande variação térmica com uma amplitude que varia, durante o ano, de máximas acima de 40°C e de mínimas abaixo de zero.

O projeto do Campus UFSM-CS está sendo implantado na latitude 30°00'42,2”S e longitude 52°56'22,5”O, na Rodovia Taufik Germano, 1013, no bairro Passo da Areia, distante aproximadamente 3km em linha reta do rio Jacuí. O terreno possui 82 ha e está localizado próximo a rótula de acesso da cidade, pela BR 153 no sentido Santa Maria - Cachoeira do Sul (Figura 17).

Figura 15 - Localização do Campus UFSM-CS



Fonte: (GOOGLE, 2017)

A implantação do campus projeta-se no plano mais alto do terreno dividindo-se em quadras onde estarão os prédios de salas de aula, de laboratórios e de salas de professores. Equipamentos auxiliares como biblioteca, restaurante universitário, prédio administrativo, alojamento para estudantes serão distribuídos ao longo do terreno sem configurar quadras (Figura 18).

Figura 16 - Implantação Campus UFSM-CS



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

As quadras são compostas de dois prédios de salas de aula à frente, um prédio de salas de professores ao centro e dois prédios de laboratórios ao fundo. Uma lancheria, praça de convivência e as circulações entre os prédios completam a urbanização da quadra. Os prédios com as fachadas laterais em azul são os prédios em estudo (Figura 19).

Figura 17 – Vista das quadras

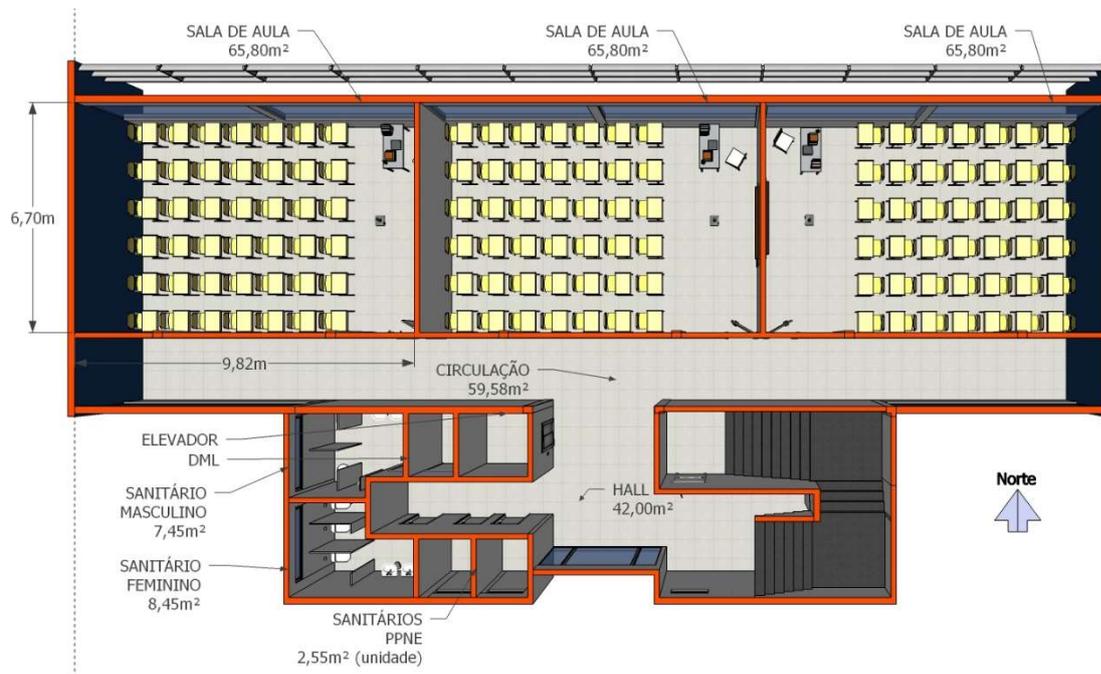


Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

O prédio objeto de estudo desta pesquisa é a edificação destinada às salas de aula, de três pavimentos, composto por nove salas de aula, distribuídas três em cada pavimento, orientadas para o norte, deixando para sul a entrada do prédio, circulações e recintos de apoio

como banheiros e DML (depósito de material de limpeza). Cada sala de aula pode ser ocupada por 42 alunos e um professor. A Figura 20 mostra a planta baixa do prédio com as informações relatadas acima.

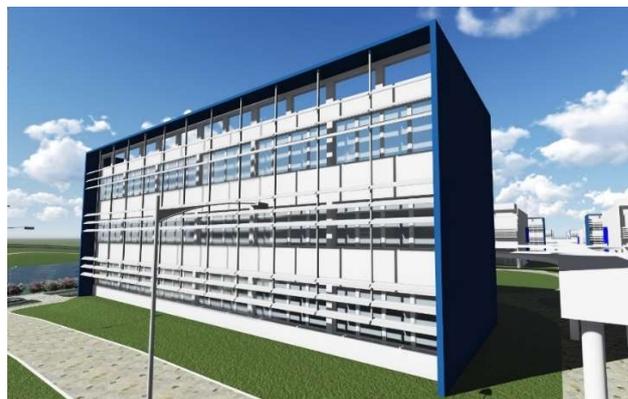
Figura 18 - Planta Baixa Pavimento Tipo



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Os fechamentos opacos preveem estrutura em concreto armado, com paredes de vedação de tijolos furados com 20 cm de espessura nominal, pintadas de azul escuro e branco conforme nos mostra a Figura 21.

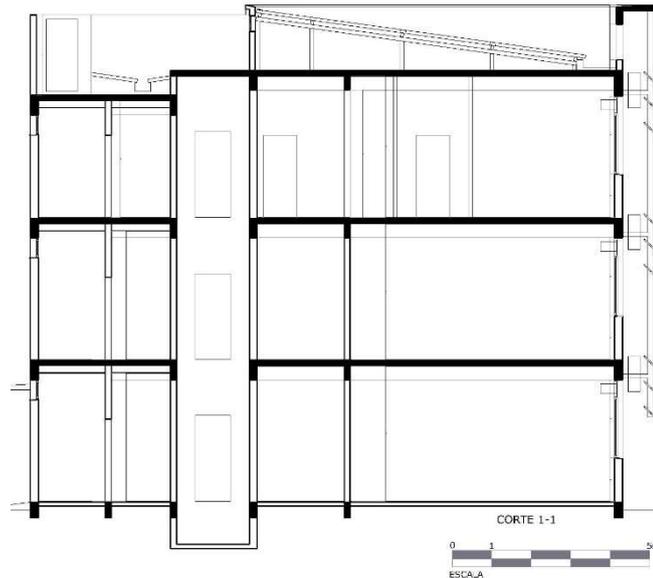
Figura 19 - Cores indicadas no projeto original



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Os fechamentos transparentes foram projetados com caixilhos de alumínio branco e vidros transparentes 4 mm para as janelas e 6 mm para as portas. Na fachada norte onde encontram-se as aberturas para ventilação e iluminação das salas de aula existe a previsão de instalação de um brise metálico fixo com inclinação de 45° (Figura 22).

Figura 20 - Corte transversal



Fonte: (PROINFRA, 2017)

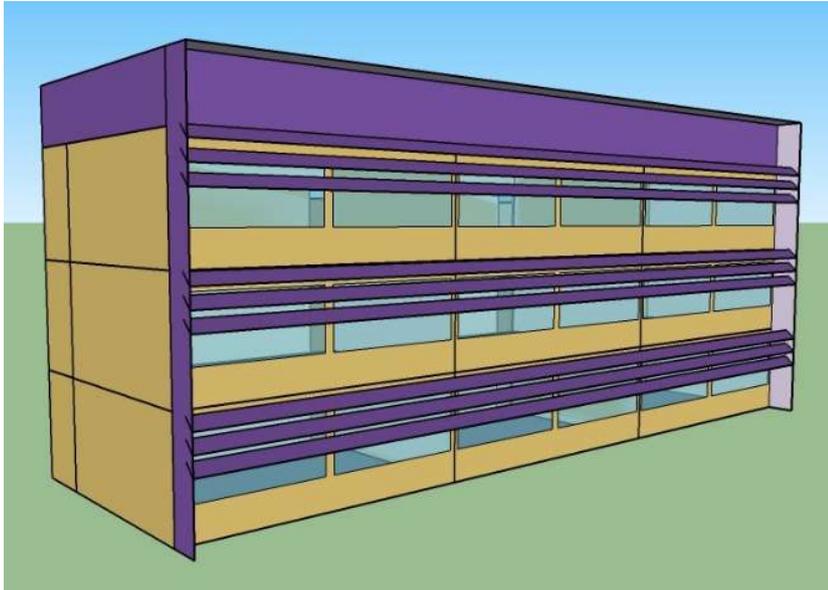
3.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO CONFORTO TÉRMICO DO PROJETO ORIGINAL

A avaliação do comportamento térmico e do conforto térmico teve como finalidade conhecer os fluxos térmicos e os índices de conforto da edificação em estudo. Para compilar estes dados foi realizada a primeira modelagem e a primeira simulação do prédio como foi projetado originalmente.

3.2.1 Modelagem e cadastro de dados

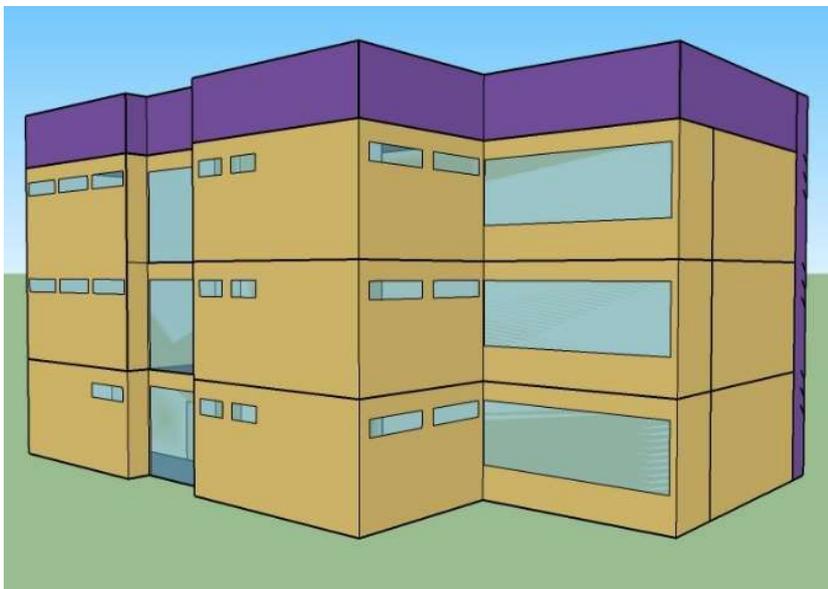
O comportamento térmico foi avaliado através de simulação computacional, utilizando o *software* EnergyPlus, versão 8.7 e o *software* Sketchup Make 2017 para a modelagem do prédio em 3D. A interface entre os dois programas foi feita pelo *software* Euclid 0.9.3 (Figura 23 e Figura 24).

Figura 21 –Vista frontal da modelagem



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

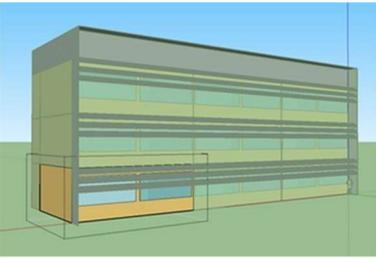
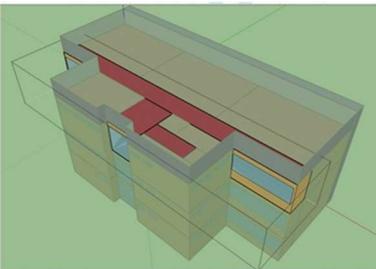
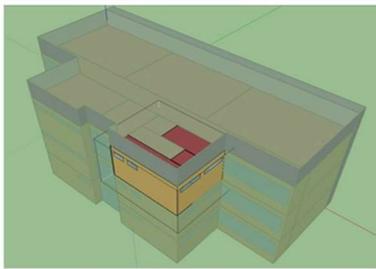
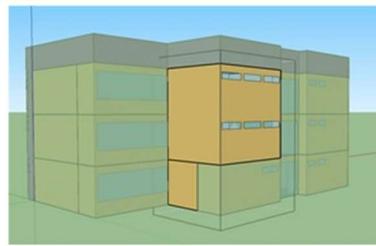
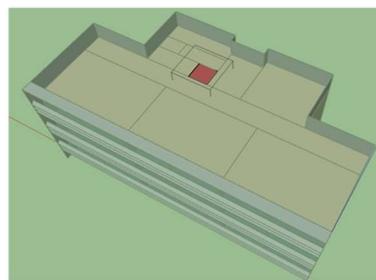
Figura 22- Vista posterior da modelagem



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

O prédio de salas de aula foi dividido em 17 zonas térmicas por meio da avaliação das diferenças e semelhanças das trocas térmicas que ocorrem em cada uma (Tabela 2).

Tabela 3 - Zonas Térmicas

ZONAS TÉRMICAS		
TIPO	NOME	EXEMPLO
SALA DE AULA	SALA 101	
	SALA 102	
	SALA 103	
	SALA 201	
	SALA 202	
	SALA 203	
	SALA 301	
	SALA 302	
	SALA 303	
CIRCULAÇÃO	CIRC. 106	
	CIRC. 205	
	CIRC. 305	
BANHEIROS	BAN. 108	
	BAN. 206	
	BAN. 306	
ESCADA	ESC. 105	
ELEVADOR	ELE. 107	

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Os dados cadastrados nas agendas de atividade, ocupação, iluminação e equipamentos, foram registrados no EnergyPlus após a modelagem.

A agenda de atividades que registra o calor liberado pelos ocupantes da edificação foi

elaborada com base na NBR 16401 (2008, p. 52), na tabela C1 que identifica a taxa típica de calor liberado por pessoa. O nível de atividade considerado para as salas de aula do prédio estudado foi “Sentado, trabalho leve” estipulado dentro da faixa indicada em 120 W/pessoa. A população foi registrada com 40 alunos e 1 professor.

As zonas consideradas como ocupadas foram as salas de aula, único recinto de atividades permanentes. Os banheiros e circulações foram desconsiderados quanto a ocupação. A agenda de ocupação exclui os períodos de férias de verão e de férias de inverno e demonstra a variação da ocupação durante o dia, mensurando a fração de ocupantes do prédio (Tabela 3).

Tabela 4 - Agenda de ocupação

Agenda de ocupação			
Período	Fração	Atividade	Tipo
01 jan. - 03 mar.			
00h00 - 24h00	0	férias	sem ocupantes
04 mar. - 19 jul.			
00h00 - 07h00	0	período de aulas	sem ocupantes
07h00 - 07h30	0,05		serviço de apoio
07h30 - 12h30	1		atividades em sala de aula
12h30 - 13h00	0,1		serviço de apoio
13h00 - 17h00	1		atividades em sala de aula
17h00 - 18h00	0,1		serviço de apoio
18h00 - 23h00	1		atividades em sala de aula
23h00 - 24h00	0		sem ocupantes
19 jul. - 05 ago.			
00h00 - 24h00	0	férias	sem ocupantes
05 ago. - 11 dez.			
00h00 - 07h00	0	período de aulas	sem ocupantes
07h00 - 07h30	0,05		serviço de apoio
07h30 - 12h30	1		atividades em sala de aula
12h30 - 13h00	0,1		serviço de apoio
13h00 - 17h00	1		atividades em sala de aula
17h00 - 18h00	0,1		serviço de apoio
18h00 - 23h00	1		atividades em sala de aula
23h00 - 24h00	0		sem ocupantes
11 dez. - 31 dez.			
00h00 - 24h00	0	férias	sem ocupantes

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Na agenda de iluminação considerou-se que a dissipação de calor liberada pela iluminação de 16 W/m², conforme NBR 16401 (2008, p. 53), na tabela C2 que identifica a taxas típicas de dissipação de calor pela iluminação. O local com atividades mais semelhantes, de leitura e estudo, considerado para esta configuração foi uma biblioteca.

Os equipamentos elétricos considerados para as salas de aula foram configurados com uma densidade de carga alta de 21,5 W/m², conforme a NBR 16401 (2008, p. 55). A escolha baseou-se nos cursos técnicos que são oferecidos pelo campus, onde a utilização de computadores é de um por aluno e utilizam programas gráficos ou de cálculo que despendem maior uso da energia.

As agendas de iluminação e equipamentos possuem as mesmas especificações, pois estes itens serão utilizados concomitantemente (Tabela 4).

Tabela 5 - Agenda de Iluminação e Equipamentos

Agenda de Iluminação e equipamentos			
Período	Fração	Atividade	Tipo
01 jan. - 03 mar.			
00h00 - 24h00	0	férias	sem ocupantes
04 mar. - 19 jul.			
00h00 - 07h00	0	período de aulas	sem ocupantes
07h00 - 07h30	0,5		serviço de apoio
07h30 - 12h30	1		atividades em sala de aula
12h30 - 13h00	0,5		serviço de apoio
13h00 - 17h00	1		atividades em sala de aula
17h00 - 18h00	0,5		serviço de apoio
18h00 - 23h00	1		atividades em sala de aula
23h00 - 24h00	0		sem ocupantes
19 jul. - 05 ago.			
00h00 - 24h00	0	férias	sem ocupantes
05 ago. - 11 dez.			
00h00 - 07h00	0	período de aulas	sem ocupantes
07h00 - 07h30	0,5		serviço de apoio
07h30 - 12h30	1		atividades em sala de aula
12h30 - 13h00	0,5		serviço de apoio
13h00 - 17h00	1		atividades em sala de aula
17h00 - 18h00	0,5		serviço de apoio
18h00 - 23h00	1		atividades em sala de aula
23h00 - 24h00	0		sem ocupantes
11 dez. - 31 dez.			
00h00 - 24h00	0	férias	sem ocupantes

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

A última etapa do cadastramento de dados do prédio original foi a configuração dos materiais utilizados e suas características termofísicas (Tabela 5).

Tabela 6 - Configuração dos materiais.

Material	Rugosidade	Espes-sura (m)	Condu-tividade (W/m-K)	Densi-dade (kg/m ³)	Calor Especí-fico (J/kg-K)	Absortância	
						Térmi-ca	Solar
Tijolo Furado Parede Externa (equivalente)	Medianamente áspero	0,04485	1	1406,56	920	-	-
Tijolo Furado Parede Interna (equivalente)	Medianamente áspero	0,01645	1	5827,35	920	-	-
Tijolo Maciço (equivalente)	Medianamente áspero	0,1068	1	2028,72	920	-	-
EPS Laje (equivalente)	Medianamente áspero	0,005192	0,04	147,51	1420	-	-
EPS	Medianamente áspero	0,08	0,04	35	1420	-	-
Reboco Pintura Branca	Medianamente áspero	0,03	1,15	2000	1000	0,9	0,2
Reboco Pintura Azul	Medianamente áspero	0,03	1,15	2000	1000	0,9	0,8
Revestimento Cerâmico	Muito suave	0,01	1	2000	920	0,9	0,2
Argamassa de Assentamento	Medianamente áspero	0,04	1,15	2000	1000	-	-
Concreto	Medianamente áspero	0,05	1,75	2400	1000	-	-
Porta interna de madeira	Suave	0,03	0,23	600	1340	0,9	0,2
Porta metálica corta-fogo	Suave	0,03	52	2700	460	0,9	0,7
Telha de Aço Galvanizado	Suave	0,006	52	2780	460	0,9	0,15
Revestimento Vinílico	Muito suave	0,01	0,2	1200	100	0,9	0,2
Revestimento Basalto Polido	Suave	0,02	1,6	2700	840	0,9	0,9

Fonte: ABNT, 2005; GARLET, 2017; LACCHINI, 2010

A simulação do prédio original gerou os dados quantitativos transformados em gráficos que demonstraram a variação dos fluxos térmicos na edificação.

Para a avaliação do comportamento térmico do prédio original foram avaliados os seguintes fluxos térmicos:

- a) ganhos de calor pela ocupação;
- b) ganhos de calor pelos equipamentos;
- c) ganhos de calor pela iluminação;
- d) perdas e ganhos de calor nos fechamentos transparentes;
- e) perdas e ganhos de calor por infiltração latente;

- f) perdas e ganhos de calor por infiltração sensível;
- g) perdas e ganhos de calor por condução pelas superfícies de piso junto ao solo;
- h) perdas e ganhos de calor por condução nas superfícies de cobertura;
- i) perdas e ganhos de calor nas superfícies opacas verticais.

Estes dados indicaram a localização e a intensidade das trocas de calor no projeto original. Por meio destas informações foi possível indicar os elementos da edificação sensíveis ao calor e que conseqüentemente geravam resfriamento ou aquecimento ao ambiente.

A avaliação do conforto térmico está normatizada pela ASHRAE 55 – Environmental conditions for human occupancy (2013), que emprega o modelo adaptativo para ambientes ventilados naturalmente.

Os dados necessários para análise do conforto térmico são a temperatura externa e a temperatura operativa. A temperatura externa é calculada pelo arquivo climático utilizado na simulação computacional. A temperatura operativa de cada zona térmica é uma variável calculada pelo EnergyPlus. Após calcula-se a média ponderada, relacionando a área com a temperatura operativa de cada zona térmica, obtendo-se uma média geral para o prédio. Esses valores são inseridos em uma planilha digital que calcula o índice de conforto e desconforto térmico, conforme o percentual de aceitabilidade de 80% de satisfação nas horas ocupadas.

A análise do conforto térmico do projeto original indicou a porcentagem dos usuários satisfeitos e insatisfeitos com as condições de conforto.

As técnicas de climatização natural foram divididas em dois grupos pela necessidade de ajustar as informações de entrada ao programa de simulação EnergyPlus, são elas:

- a) estratégias com ventilação natural calculada;
- b) estratégias com ventilação natural estimada.

As estratégias com ventilação natural calculada utilizam a ferramenta *Airflow Network: Simulation Control*, disponível no EnergyPlus, para calcular a ventilação natural através das informações do arquivo climático ao longo do ano. Para as estratégias com ventilação natural estimada utilizou-se o comando *Zone Ventilation Design Flow Rate* que necessita da informação de quantas renovações de ar por hora são feitas no ambiente, sem calcular os dados fornecidos pelo arquivo climático. As renovações estimadas nas simulações com *Zone Ventilation Design Flow Rate* foram obtidas através da média ponderada das trocas de ar de cada tipo de zona térmica do prédio original. As renovações de ar foram calculadas a cada hora e ponderadas pelas áreas das zonas térmicas, para que fosse aplicada uma média anual de

ventilação para as zonas de salas de aula, zonas de circulação e zonas de banheiros.

Os gráficos dos fluxos térmicos e a avaliação do percentual de conforto térmico dos usuários foram a base para a análise comparativa da eficiência das estratégias.

3.3 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DAS ESTRATÉGIAS INDIVIDUAIS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL

A cidade de Cachoeira do Sul ainda não possui uma carta climática, portanto foi utilizada a carta climática de Santa Maria (FLORES, 2014) e suas indicações de estratégias de climatização natural.

As técnicas citadas na Tabela 6 foram simuladas no programa EnergyPlus, para que fosse avaliada a sua influência individualmente sobre o conforto térmico do prédio.

Tabela 7 - Classificação das estratégias

Estratégias com Ventilação Natural Calculada	Ventilação natural	Ventilação cruzada
	Sombreamento e iluminação natural	Brises
		Estantes de luz
		Sombreamento com vegetação
	Inércia térmica	
	Aquecimento solar passivo	Parede trombe
		Parede de vidro
Isolamento térmico		
Absortância solar		
Estratégias com Ventilação Natural Estimada	Ventilação natural	Dutos subterrâneos
		Chaminé solar

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

As próximas seções relatam o procedimento utilizado para a análise de cada uma das estratégias.

3.3.1 Estratégias com ventilação natural calculada

Nesta seção estão descritas as estratégias onde utilizou-se a ferramenta *Airflow Network: Simulation Control*, do EnergyPlus, simulando a ação do vento por meio do arquivo climático.

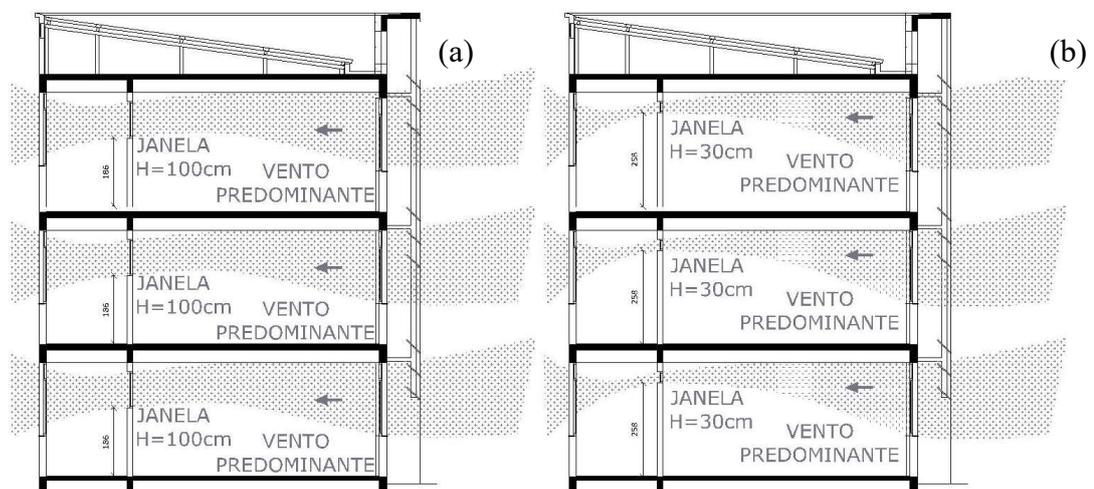
3.3.1.1 Ventilação cruzada

A ventilação cruzada foi implementada no projeto original com a colocação de janelas

entre as salas de aula e a circulação. As janelas escolhidas para as simulações foram dimensionadas para localizarem-se acima da visão do aluno, longitudinalmente a sala e abaixo da viga de suporte da laje. Duas alturas foram escolhidas para serem testadas: 30 cm e 100 cm, com o objetivo de analisar o fluxo do ar em um nível superior e com menor área de ventilação e em um nível mais baixo com maior área para passagem do ar (Figura 25).

O projeto original foi simulado previamente para as duas alternativas de altura e a escolha da medida da janela para a ventilação cruzada foi feita pelo melhor resultado na melhoria do conforto térmico.

Figura 23 - Disposição das janelas – (a) 100cm de altura (b) 30cm de altura

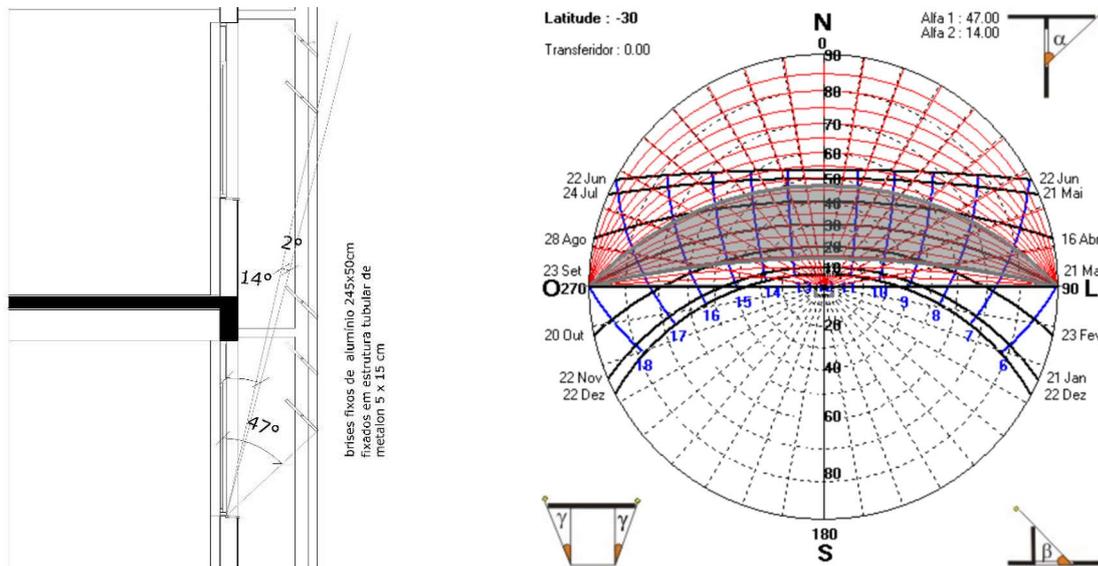


Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

3.3.1.2 Brises

Os brises que estavam especificados no projeto resultaram em uma máscara de sombreamento que prevê sombra na primavera e verão. Uma pequena área não é protegida, quando o sol está mais alto no horizonte, entre setembro e março. Esse fato altera significativamente a atuação do brise, permitindo uma entrada de radiação solar nos períodos de primavera e verão (Figura 26).

Figura 24 - Corte do brise e máscara de sombreamento

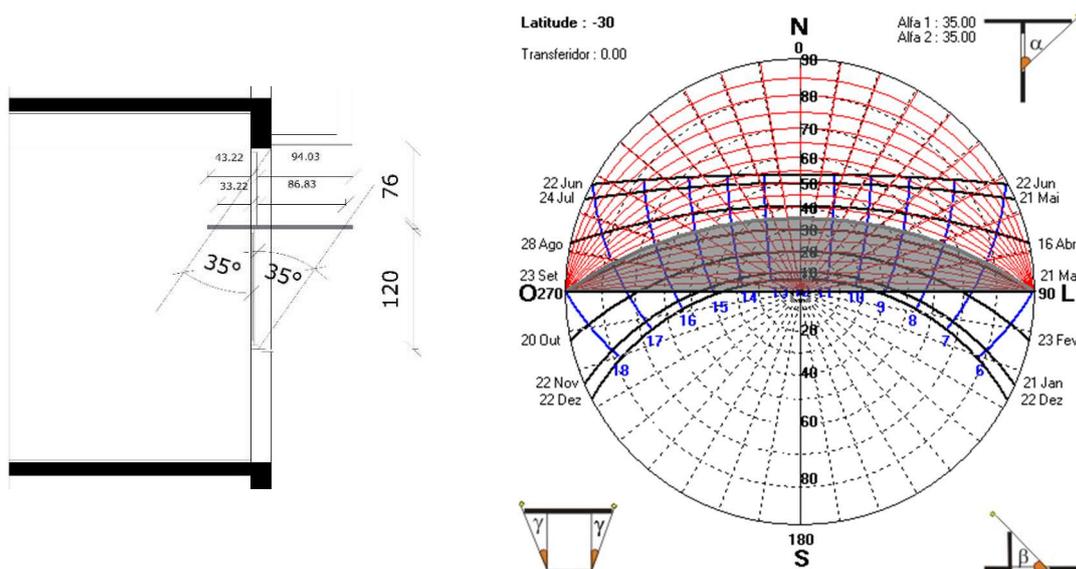


Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

3.3.1.3 Estantes de luz

A estante de luz simulada teve como objetivo sombrear toda a sala durante a primavera e verão, permitindo que a luz seja refletida na parte superior iluminando a sala (Figura 27).

Figura 25 - Corte da estante de luz e máscara de sombreamento



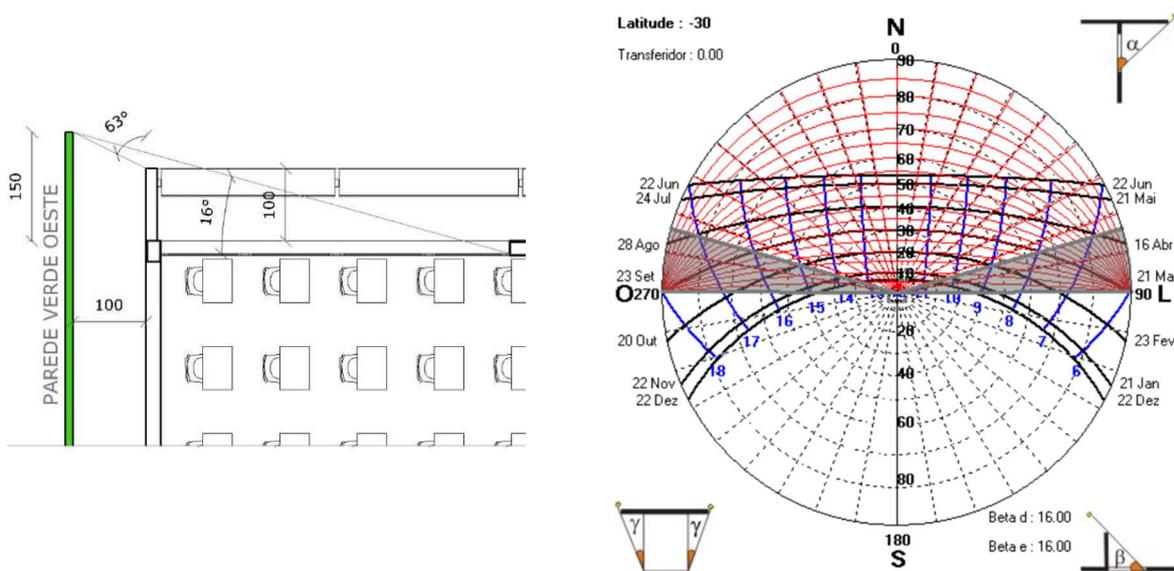
Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Não foram especificados vidros seletivos na parte superior da abertura.

3.3.1.4 Sombreamento com vegetação

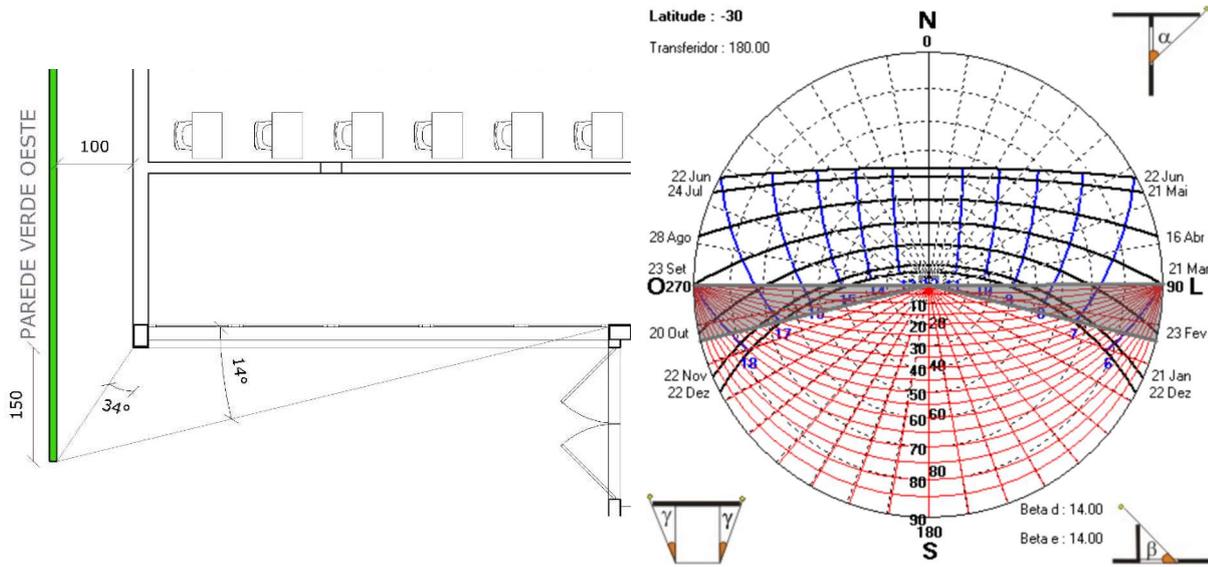
No sombreamento com vegetação a espécie especificada foi a *Wisteria floribunda* (Glicínia). O percentual de transmissão solar PTS desta planta está especificado na tabela 1. Foram estudadas três situações de sombreamento com vegetação: sombreamento oeste – leste (Figura 28, Figura 29 e Figura 30), que prevê uma parede de vegetação a oeste e a leste diminuindo o aquecimento solar nos períodos mais quentes do ano nas paredes laterais das salas de aula; sombreamento norte perpendicular (Figura 31), que prevê o sombreamento da fachada norte durante a manhã e tarde pela incidência do sol mais baixo no horizonte; e por fim, sombreamento norte paralelo (Figura 32), que proporciona sombra em toda a fachada norte, conforme o PTS da planta.

Figura 26 - Sombreamento oeste-leste - máscara de sombreamento para a fachada norte



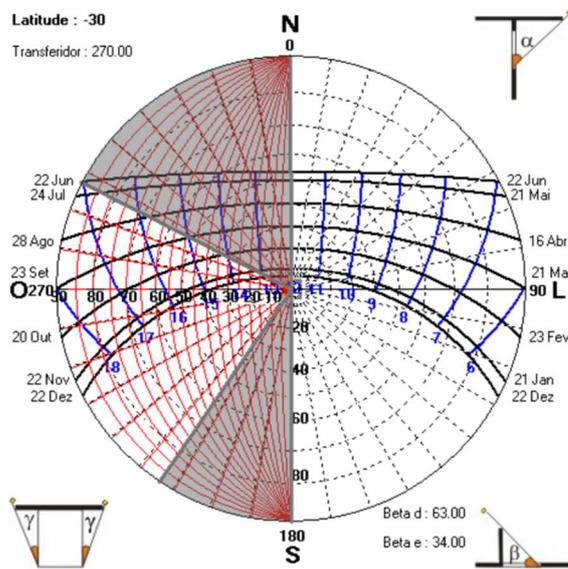
Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Figura 27 - Sombreamento oeste-leste - máscara de sombreamento para a fachada sul



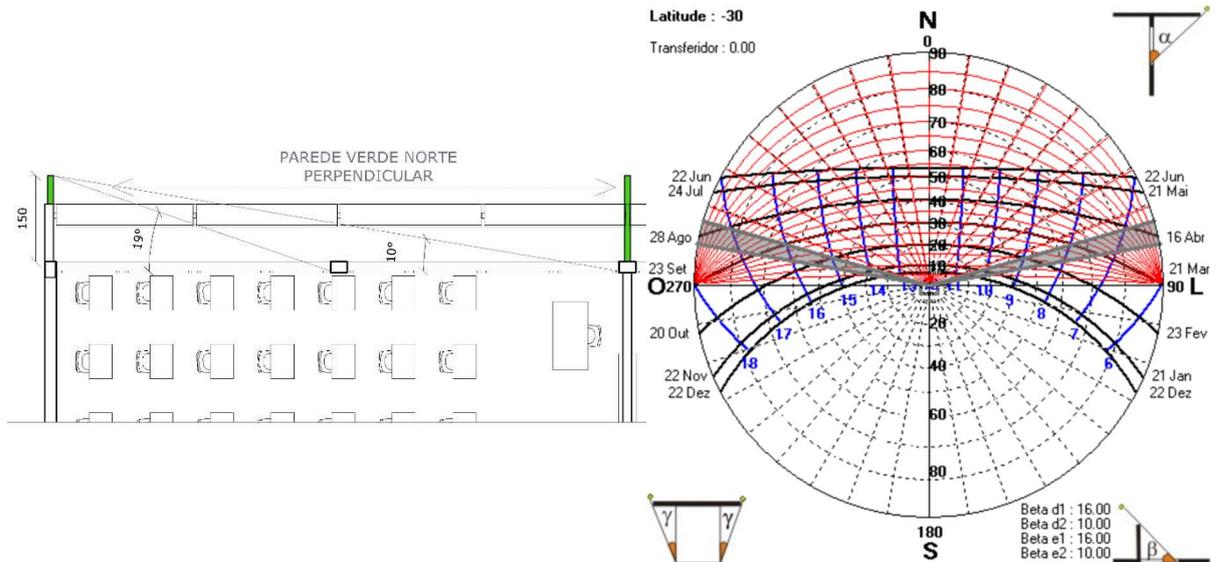
Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Figura 28 - Sombreamento oeste-leste - máscara de sombreamento para as fachadas oeste e leste



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Figura 29 - Sombreamento norte Perpendicular - Planta baixa e máscara de sombreamento



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Figura 30 - Sombreamento Norte Paralelo - Planta baixa



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

3.3.1.5 Inércia Térmica

Os tijolos utilizados na obra são tijolos furados e tijolos maciços. Os tijolos furados (Figura 33) foram utilizados como vedação de todas as paredes do prédio com exceção da parede corta fogo, localizados na escada, onde foi especificado o uso de parede simples de tijolos maciços (Figura 34).

Figura 31 - Tijolo furado 11x14x24



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Figura 32 - Tijolo maciço 11,5x5x24



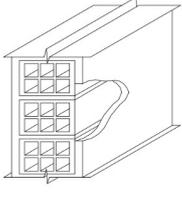
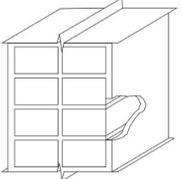
Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

A NBR 15220 (2005) mostra exemplos de paredes semelhantes em suas características térmicas: Transmitância térmica, Capacidade térmica e Atraso térmico. Essas características demonstram que a inércia térmica da parede dupla de tijolos maciços é consideravelmente maior que a de tijolos furados. Quando comparado o atraso térmico entre as duas composições nota-se uma diferença de 2,1 horas a mais na parede de tijolos maciços do que na a parede de tijolos furados e a capacidade térmica da parede de tijolos maciços é 238 kJ/(m².K) maior que a parede de tijolos furados (Tabela 7).

O aumento da inércia térmica foi estudado simulando-se uma parede de tijolos maciços duplos em todas as paredes do prédio.

Tabela 8 - Comparação das caraterísticas térmicas das paredes

Tabela D.3 (continuação) – Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico para algumas paredes.

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ [horas]
	Parede de tijolos de 6 furos quadrados, assentados na maior dimensão Dimensões do tijolo: 9,0x14,0x19,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 19,0 cm	2,02	192	4,5
	Parede dupla de tijolos maciços, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	2,30	430	6,6

Fonte: (ABNT, 2005, p. 20)

3.3.1.6 Isolamento térmico

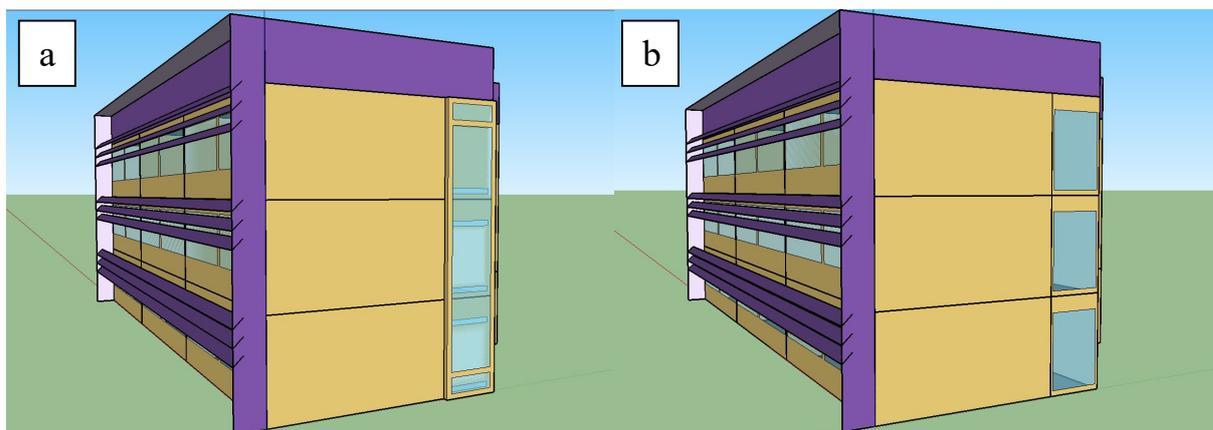
A parede especificada no projeto original tem transmitância térmica de 2,11 W/m².K e

a cobertura tem uma transmitância ascendente de $3,34 \text{ W/m}^2\text{.K}$ e descendente de $0,3694 \text{ W/m}^2\text{.K}$. O isolamento térmico escolhido para as paredes e para a laje de cobertura foi uma camada de dois centímetros de lã de vidro e um acabamento com placas de gesso acartonado na espessura de 1cm. A lã de vidro caracteriza-se como um excelente isolante térmico com uma densidade de 50 kg/m^3 , condutividade de $0,045 \text{ W/(m.K)}$ e calor específico de $0,70 \text{ kJ/(kg.K)}$ (ABNT, 2005, p. 18). O gesso acartonado especificado como acabamento também contribui para o isolamento com uma densidade de 850 kg/m^3 , condutividade de $0,25$ à $0,35 \text{ W/(m.K)}$ e calor específico de $0,84 \text{ kJ/(kg.K)}$ (PLACO, 2018; GARLET, 2016).

3.3.1.7 Parede trombe e parede de vidro

O prédio de salas de aula possui orientação norte para todas as salas de aula e ao sul se posicionam os banheiros, circulação vertical e circulação horizontal. A circulação horizontal caracteriza-se por um corredor de 30 m de comprimento por 2,20 m de largura, ventilado e iluminado, ao sul, por duas janelas, que juntamente cobrem uma área de parede igual a 20 m^2 . A circulação destaca-se como o ambiente mais frio do prédio pelo grande volume de ar que pode conter, a facilidade de ventilação pela extensão do recinto e a orientação sul, por isso foi o local escolhido para as simulações das estratégias de aquecimento: parede trombe e parede de vidro (Figura 35).

Figura 33 - Parede trombe (a) e parede de vidro (b)



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

A parede trombe e a parede de vidro foram inseridas no projeto nas fachadas oeste e leste cobrindo toda a extensão da parede com o objetivo de absorver a radiação do sol da manhã

e da tarde. As duas grandes aberturas ao sul da circulação foram retiradas nestas simulações para que o aquecimento fosse mais eficiente.

3.3.1.8 Absortância

A cor para as paredes leste e oeste do objeto de estudos foi especificada no projeto como azul escuro, cor característica da instituição. A absortância dessa cor é alta, ampliando o calor nas áreas em que foi indicada, especialmente na fachada oeste onde a incidência direta do sol da tarde, com o prédio já aquecido, amplia o desconforto por calor.

A alternativa para melhorar o conforto nos períodos mais quentes foi especificar a parede com a cor branca. Foram feitas simulações com tinta acrílica branca e azul.

Conforme o catálogo de propriedades térmicas do RTQ-C (BRASIL, 2009) a absortância da tinta acrílica semibrilho na cor azul é de 79,9, a da tinta acrílica fosca na cor branca é de 15,8 e a da tinta acrílica semibrilho branco gelo 36,2. Foi escolhida uma absortância de 0,20 para a tinta acrílica semibrilho na cor branca e 0,8 para a tinta acrílica semibrilho na cor azul.

3.3.2 Estratégias com ventilação natural estimada

Nesta seção estão descritas as estratégias onde se utilizou a ferramenta *Zone Ventilation Design Flow Rate* que necessita da informação de quantas renovações de ar por hora são feitas no ambiente, sem calcular os dados fornecidos pelo arquivo climático. Optou-se por simular estas estratégias com a ventilação sempre ligada durante todo o ano, avaliando ao máximo sua capacidade de resfriamento.

3.3.2.1 Dutos enterrados

O dimensionamento dos dutos enterrados avaliados baseou-se no trabalho de Camargo (2017). Foram calculadas para cada sala de aula (Anexo 1), três dutos de concreto 30 cm de diâmetro, com 50 m de comprimento e enterrados a 1,5 m de profundidade, que resultaram em uma vazão de 0,424 m³/s. A escolha se baseou em menor custo de escavação, distribuição homogênea na sala e as indicações da revisão bibliográfica.

No programa EnergyPlus não é possível especificar a localização da entrada dos dutos no recinto em que irá atuar, portanto é calculada somente uma entrada de ar proveniente do

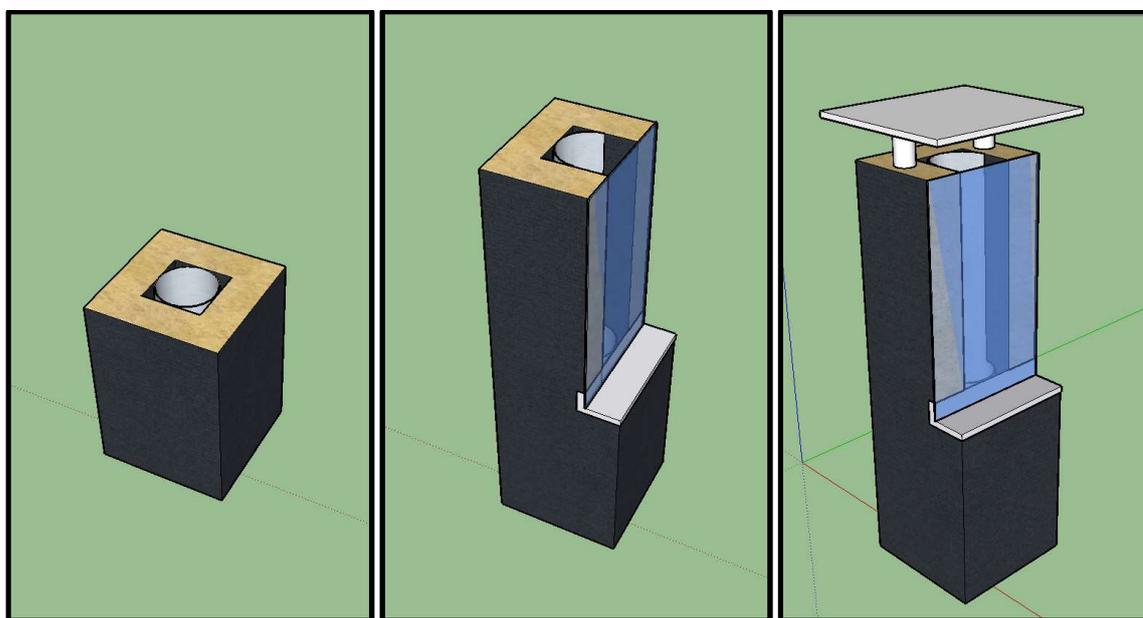
duto que afeta na temperatura do recinto. A vazão não é calculada no *software* e deve ser indicada na simulação.

Foi simulado um duto com área equivalente de contato com o solo análoga aos três dutos de 30 cm predefinidos, com 90 cm de diâmetro, 50 m de comprimento e profundidade de 1,5 m.

3.3.2.2 Chaminé solar

As chaminés solares foram implantadas uma em cada sala de aula. O cálculo inicial para o dimensionamento da vazão está no anexo 1. Optou-se por utilizar nas simulações das chaminés, como base para a avaliação, a dimensão da entrada e saída igual ou similar a dos dutos enterrados, portanto, três chaminés de diâmetro de 30 cm para cada sala de aula. A chaminé projetada tem paredes de tijolos maciços que revestem um duto de aço inox, e culminam em uma ponteira de vidro que aquece a saída do duto (Figura 36).

Figura 34 - Detalhe do projeto da chaminé

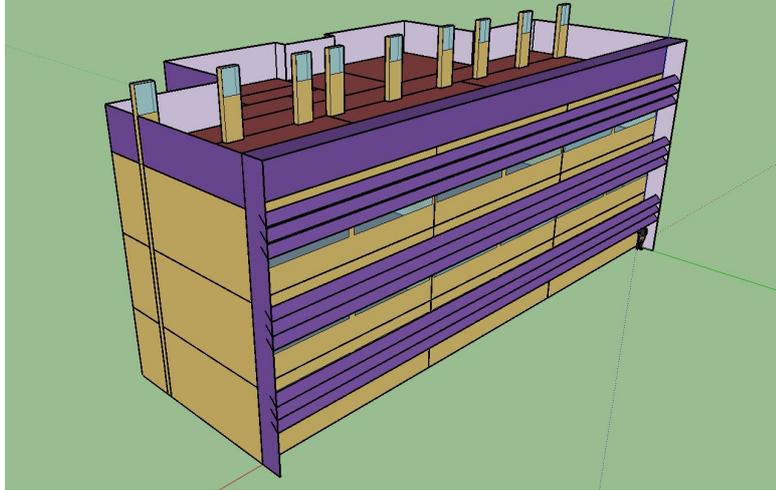


Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Da mesma forma que ocorre com os dutos enterrados foi necessário simular uma chaminé equivalente as três chaminés calculadas para cada sala de aula, pois o software EnergyPlus permite somente uma chaminé por zona térmica. As nove salas de aula foram equipadas cada uma com uma chaminé solar equivalente com 90 cm de largura e 30 cm de

profundidade (Figura 37).

Figura 35 - Chaminés solares



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

3.3.2.3 Avaliação das estratégias de climatização natural simuladas por ventilação natural estimada simuladas em conjunto

Os dutos enterrados e as chaminés solares se complementam como estratégias de ventilação natural, os dutos enterrados como entrada de ar no ambiente e as chaminés solares como saída de ar. Realizou-se simulações com estas duas estratégias comparando a eficiência deste conjunto com a indicação de renovações de ar (ventilação natural estimada) e com as janelas fechadas (ventilação cruzada através de dutos e chaminés somente).

3.4 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DAS SOLUÇÕES COMPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL

As simulações compostas agregam estratégias de climatização natural com o objetivo de avaliar a influência dos conjuntos sobre o conforto térmico do prédio e foram realizadas nesta etapa.

As escolhas das composições foram feitas através da análise dos fluxos térmicos do projeto original, da análise do conforto térmico das melhores estratégias simuladas e da soma dos melhores resultados pela avaliação dos fluxos térmicos e dos melhores resultados de conforto térmico.

3.4.1 Estratégias compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos

O projeto original foi simulado para que fosse possível quantificar o ganho e a perda de calor em toda a edificação. Com essas informações foram produzidos gráficos anuais de fluxos térmicos.

As estratégias compostas pela avaliação destes fluxos foram escolhidas com a finalidade de evitar as trocas de calor indesejadas, buscando promover o equilíbrio térmico.

Com a avaliação do comportamento térmico e do conforto térmico do projeto original, foi possível identificar a necessidade de resfriar ou aquecer o prédio. Analisando os gráficos foram selecionados os pontos a serem isolados para evitar as trocas indesejadas.

Foi simulada uma composição com os dois elementos de construção do prédio que indicavam as necessidades de isolamento para melhorar o conforto térmico das salas de aula e comparada com as simulações individuais de isolamento.

3.4.2 Estratégias compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico

Todas as estratégias avaliadas individualmente resultaram em um registro com as porcentagens de horas de conforto (referentes a 80% de ocupantes que se sentem confortáveis), as horas de desconforto por calor e as horas de desconforto por frio.

Para compor as simulações que agregaram as melhores estratégias de conforto selecionou-se as cinco estratégias que obtiveram melhor índice de conforto e que foram avaliadas da seguinte forma:

- a) a primeira e a segunda estratégias mais bem-sucedidas avaliadas conjuntamente;
- b) a primeira, a segunda e a terceira estratégias mais bem-sucedidas avaliadas conjuntamente;
- c) as cinco estratégias mais bem-sucedidas avaliadas conjuntamente.

Os dutos enterrados e as chaminés solares foram simulados conjuntamente para que fosse possível analisar-se o comportamento das duas estratégias relativas ao resfriamento das salas de aula, em situações com ventilação natural estimada e sem ventilação natural. Diferentemente das outras estratégias, os dutos enterrados e as chaminés solares fazem parte do grupo de estratégias que devem ser simulados com a ventilação natural estimada, as duas técnicas utilizam-se das trocas de ar por convecção, portanto fez-se necessário testá-las conjuntamente para averiguar suas eficiências.

3.4.3 Estratégias compostas reunidas

As últimas simulações foram realizadas com a união das estratégias avaliadas através da análise dos fluxos térmicos do prédio original juntamente com as estratégias mais bem-sucedidas de conforto térmico que resultou em uma composição:

- a) Avaliação das estratégias mais bem-sucedidas proveniente das melhores composições resultantes da avaliação de conforto térmico com as melhores composições resultantes da avaliação dos fluxos térmicos.

3.5 AVALIAÇÃO COMPARATIVA

A análise comparativa teve como objetivo comparar os resultados obtidos quando foram simuladas as estratégias compostas em conjunto, comparando as indicações provenientes da análise dos fluxos térmicos e da análise do conforto térmico com as estratégias de ventilação natural que foram simuladas por ventilação estimada. Gerando os seguintes grupos de avaliação:

- a) Avaliação das estratégias mais bem-sucedidas proveniente das melhores composições resultantes da avaliação de conforto térmico com as melhores composições das estratégias de ventilação natural estimada;
- b) Avaliação das estratégias mais bem-sucedidas das melhores composições resultantes da avaliação dos fluxos térmicos com as melhores composições das estratégias de ventilação natural estimada;
- c) Avaliação das estratégias mais bem-sucedidas proveniente das melhores composições resultantes da avaliação de conforto térmico, somadas as melhores composições resultantes da avaliação dos fluxos térmicos e somadas as melhores composições das estratégias de ventilação natural estimada.

Com esse procedimento final todas as simulações individuais e conjuntas puderam ser comparadas para estabelecer quais as estratégias ou conjunto delas teve melhor eficácia para que o prédio seja mais confortável para a maioria dos usuários.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo trata da análise dos resultados obtidos, comparando o índice de conforto térmico do projeto original com as diversas composições das estratégias de climatização natural estudadas, avaliando a eficácia de cada alternativa.

4.1 ANÁLISE COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO CONFORTO TÉRMICO DO PROJETO ORIGINAL

Esta seção está dividida em duas partes: uma trata da análise do comportamento térmico, por meio do exame dos fluxos térmicos, e a outra analisa o percentual de conforto térmico. As duas partes referem-se ao projeto original.

4.1.1 Análise do comportamento térmico do projeto original

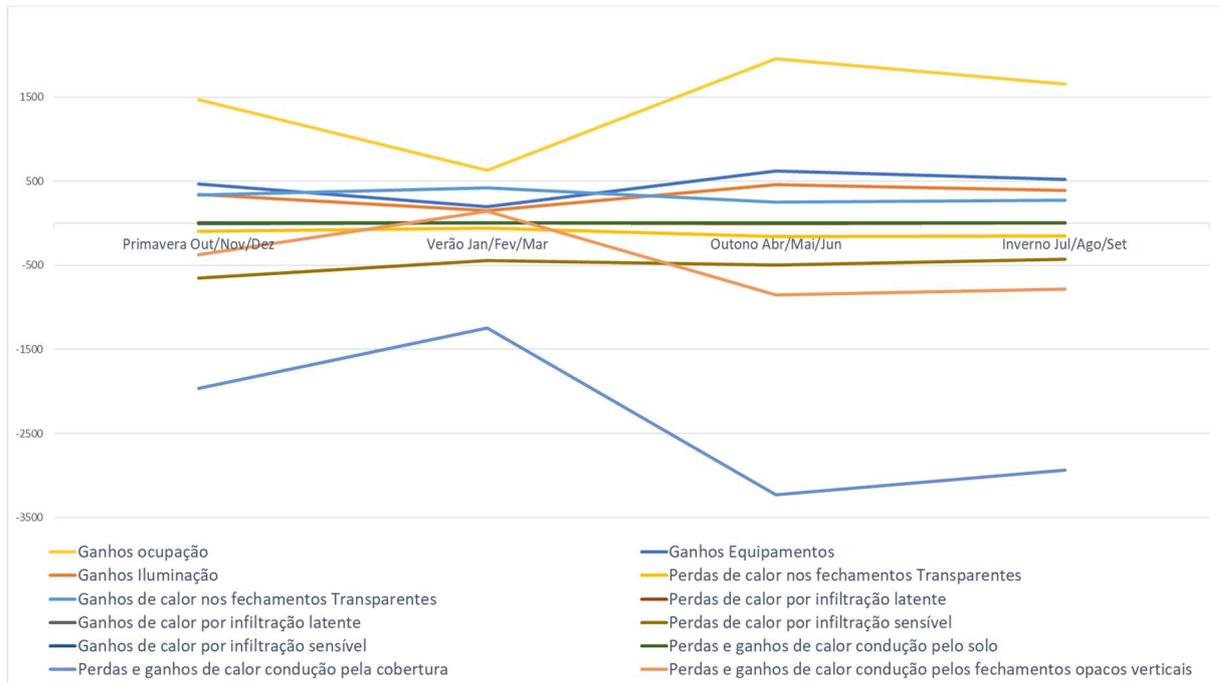
Na análise dos fluxos térmicos observa-se que em todos os pavimentos a maior geração de calor é proveniente da ocupação, com exceção do verão onde os fechamentos transparentes deixam permear uma quantidade de calor maior. Em ordem de ganho de calor os fluxos mais atuantes depois da ocupação são os equipamentos e a iluminação. As perdas de calor ocorrem pelos fechamentos opacos, em todas as estações com exceção do verão. Destaca-se no terceiro pavimento a perda de calor pela cobertura e no primeiro pavimento a perda de calor pelo solo. O segundo fluxo térmico que indica perda de calor em todo o ano é o que ocorre por infiltração sensível, influência direta da ventilação natural. Esses fluxos negativos auxiliam na dispersão do calor gerado pelas pessoas, equipamentos e iluminação.

A diminuição dos ganhos de calor no período do verão ocorre por consequência da agenda de ocupação que não prevê população nas férias escolares. A cobertura e o piso do primeiro pavimento não são isolados o que proporciona uma troca maior de calor com o meio ambiente. Os vidros comuns não são uma barreira de isolamento, por isso ocorrem ganhos de calor em todo o período oscilando conforme a temperatura externa.

Os ganhos por ocupação, equipamentos e iluminação são demandas fixas e responsáveis por grande parte do aquecimento do prédio. Os fluxos que podem ser analisados para diminuir o aquecimento do prédio são os ganhos pelos fechamentos transparentes e os ganhos por condução nos fechamentos opacos verticais. Estes são os dois únicos fluxos que geram ganhos de calor e que permitem intervenção de projeto.

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Gráfico 3 - Fluxos térmicos das salas de aula do terceiro pavimento (W)



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

4.1.2 Análise do conforto térmico do projeto original

A primeira simulação estabeleceu os índices de conforto térmico do projeto original. Cabe ressaltar que o projeto original já possui uma das estratégias estudadas que é o sombreamento com brises (Tabela 9).

Tabela 9 - Índices de conforto térmico do projeto original

Projeto original completo					
Total de horas do ano			Horas ocupadas		
Desconforto por frio	Desconforto por calor	CONFORTO	Desconforto por frio	Desconforto por calor	CONFORTO
6,06%	4,37%	89,57%	4,91%	5,64%	89,45%
Salas de aula do projeto original					
Total de horas do ano			Horas ocupadas		
Desconforto por frio	Desconforto por calor	CONFORTO	Desconforto por frio	Desconforto por calor	CONFORTO
3,42%	15,06%	81,52%	0,87%	21,63%	77,50%

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Observa-se o comportamento do conforto térmico do prédio original em quatro situações diferentes. O percentual de conforto térmico foi medido em toda a planta do prédio e somente nas áreas das salas de aula. Ao cruzar estes dados obtém-se quatro resultados que mostram o desconforto por frio, o desconforto por calor e as percentagens de horas de conforto em todo o período do ano e somente nos momentos em que a edificação está ocupada.

O projeto alcança índices de conforto acima de 75% no projeto original. A maior variação é registrada no desconforto por calor que sobe 15,99% das horas ocupadas quando se avalia o projeto completo e somente nas salas de aula. Essa variação ocorre especialmente por que na segunda alternativa não se considera o lado sul do prédio que está sem ocupação e equipamentos.

Observando os índices de conforto nota-se que eles diminuem quando as áreas sem ocupação e voltadas para o sul não são computadas. O gráfico aponta uma diminuição do conforto de 11,95 pontos percentuais nas horas ocupadas ao comparar-se o prédio completo com os recintos de salas de aula.

Observando-se os graus-hora de resfriamento e de aquecimento é nítida a maior necessidade de resfriamento do prédio (Tabela 10).

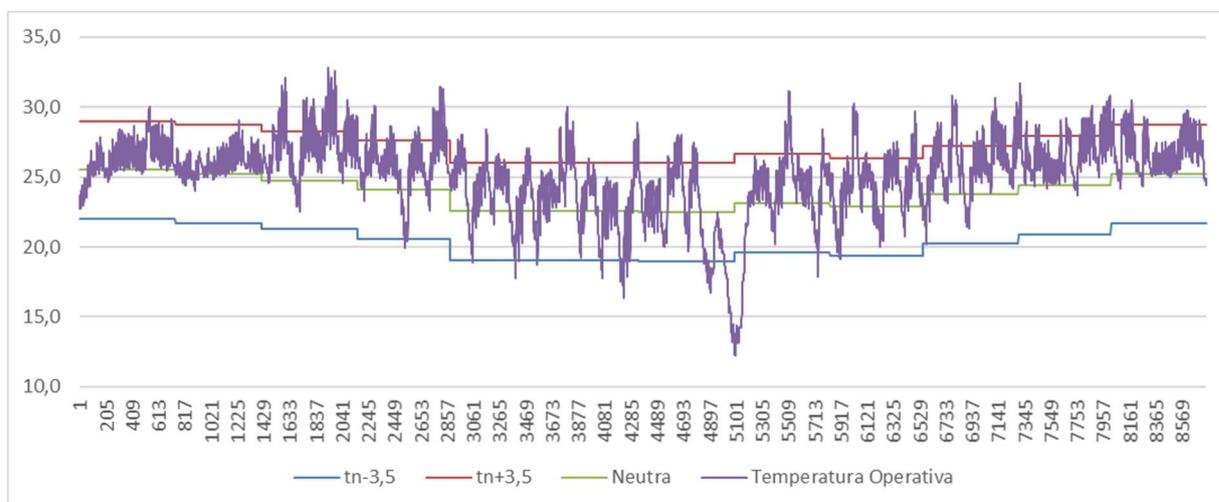
Tabela 10 - Graus-hora de resfriamento e aquecimento e horas em desconforto do projeto original

	Aquecimento	Resfriamento
Graus-hora (C)	739,8	1623
Horas em desconforto	281,0	570

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

O Gráfico 4 demonstra a variação da temperatura operativa durante cada hora do ano. A linha superior representa o limite máximo das temperaturas de conforto a cada hora e a linha inferior o limite mínimo de conforto. Ao centro a linha neutra oscila 25,2°C a 22,7°C. Os gráficos mostram um número de 37 picos de calor e 11 picos de frio durante o ano.

Gráfico 4 - Variação das temperaturas - (Graus-W x Horas/ano)



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

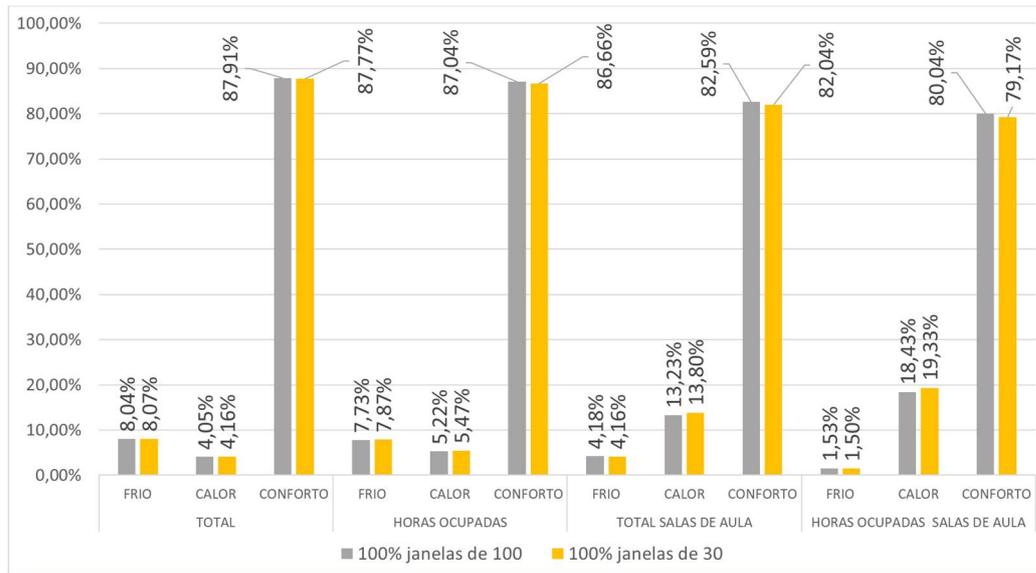
4.2 ANÁLISE DO CONFORTO TÉRMICO DAS ESTRATÉGIAS INDIVIDUAIS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL

A análise do conforto térmico de cada estratégia simulada individualmente foi dividida nesta seção em três partes: a primeira explica a escolha de uma estratégia de ventilação natural, a segunda faz uma análise do conforto térmico das estratégias de climatização natural simuladas individualmente com ventilação natural calculada e a terceira faz uma análise do conforto térmico das estratégias de climatização natural simuladas individualmente com ventilação natural estimada.

4.2.1 Seleção da altura de janela para a ventilação cruzada

Foram simuladas duas alternativas: altura de 30 cm e altura de 100 cm. Embora as janelas maiores tenham gerado um melhor conforto em toda a edificação, nas salas de aula o conforto diminuiu com as aberturas maiores. Conforme indicado no Gráfico 5, quando se avalia somente as horas ocupadas com atividades, o conforto caiu de 80,04% para 79,17%, portanto a janela de menor altura se mostrou mais eficaz para o conforto nas salas de aula e foi a escolhida para as simulações.

Gráfico 5 - Eficiência da ventilação em janelas de 100cm e 30 cm



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

4.2.2 Análise do conforto térmico das estratégias de climatização natural simuladas individualmente com ventilação natural calculada

Após obter-se os dados referentes ao projeto original simulou-se as estratégias de climatização natural individualmente. O projeto original está denominado nas tabelas como Brises (projeto original), pois este já previa a instalação deste equipamento.

Quando se analisa as estratégias indicadas pela carta de Santa Maria a alternativa que gerou o maior conforto nas salas de aula foi o sombreamento com vegetação nas paredes leste e oeste com 83,32% de conforto para 80% da população. A redução da absorvância das vedações opacas, com pintura branca nas paredes leste e oeste, é a segunda estratégia mais eficaz com nível de conforto de 82,38%, mais eficiente que o aumento da inércia térmica que atinge um nível de 80,08%.

A estratégia com menor quantidade de graus-hora de aquecimento é registrada com a colocação das estantes de luz e a melhor estratégia para o verão é o sombreamento com vegetação na fachada leste e oeste. Com as estantes de luz o índice de desconforto por frio chega a 0,03% com apenas 120,30 horas de desconforto por frio e 312,46 graus-hora de aquecimento. O sombreamento com vegetação nas fachadas leste e oeste, embora se mantenha como a melhor estratégia para o verão, mostra um índice de desconforto por calor nas horas ocupadas, chegando à 14,59%, com 1005,94 graus-hora de resfriamento. Conforme registrado na tabela 11.

Tabela 11 - Estratégias individuais com ventilação natural calculada

Classificação	Estratégias de climatização natural	Total de horas do ano			Horas ocupadas			Graus-hora de aquecimento	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas aquecimento	Horas ocupadas resfriamento
		Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto				
1	Sombr. veget. Oeste - Leste	4,98%	10,34%	84,68%	2,09%	14,59%	83,32%	1.005,94	1.041,58	364,80	376,50
2	Absortância (Parede	4,55%	11,19%	84,26%	1,85%	15,78%	82,38%	739,80	1.623,00	280,95	570,01
3	Inércia Térmica	3,11%	13,57%	83,32%	0,70%	19,23%	80,08%	701,57	1.345,45	259,39	514,48
4	Sombr. veget. Norte perp.	4,00%	13,05%	82,96%	1,39%	18,70%	79,90%	866,12	1.341,66	321,00	472,29
5	Ventilação cruzada	3,42%	14,04%	82,53%	0,87%	20,13%	79,00%	736,26	1.426,97	279,80	507,84
6	Sombre. veget. Norte paralela	2,55%	13,03%	84,43%	1,36%	19,99%	78,65%	408,65	1.421,83	142,65	512,31
7	Brisas (projeto original)	3,42%	15,06%	81,52%	0,87%	21,63%	77,50%	739,80	1.623,26	280,95	570,01
8	Isolamento térmico	1,56%	21,42%	77,02%	0,00%	34,03%	65,97%	348,68	2.609,02	135,15	1.037,66
9	Parede trombe	2,99%	24,06%	72,95%	0,63%	35,95%	63,43%	677,85	2.563,69	261,35	893,79
10	Parede de vidro	2,93%	24,67%	72,40%	0,59%	36,85%	62,56%	667,20	2.679,58	257,67	937,48
11	Estantes de luz	1,37%	33,31%	65,32%	0,03%	51,13%	48,83%	312,46	4.444,62	120,30	1.678,49

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

As estratégias individuais selecionadas por apresentarem melhores índices de conforto para serem avaliadas em conjunto foram:

- sombreamento com vegetação nas fachadas leste e oeste;
- pintura branca nas paredes laterais para diminuição da absorção solar;
- aumento da inércia térmica com utilização de parede dupla de tijolos maciços;
- sombreamento com vegetação perpendicular a fachada norte;
- ventilação cruzada com a colocação de janelas nas circulações.

Todas estas estratégias registraram um aumento de conforto em relação ao projeto original. Os índices percentuais aumentaram de 1,5% até 5,82% indicando uma melhoria significativa somente com a utilização de estratégias individuais.

As alternativas que buscavam isolar o prédio em todo o seu envelope (cobertura, vidros e paredes verticais), favorecer o aquecimento nos recintos mais frios e permitir a entrada de luz sem seleção do espectro solar mostraram índices de conforto abaixo do encontrado no projeto original.

Quando analisados os gráficos dos fluxos térmicos nota-se que a geração de calor interna proveniente da ocupação, equipamentos e iluminação são as maiores responsáveis pelos índices

de desconforto por calor. As duas fontes de calor que indicam um aquecimento nas salas de aula, além das citadas anteriormente, são os ganhos de calor pelos fechamentos transparentes e os ganhos de calor pelas superfícies opacas verticais. Embora estas apresentem menor intensidade de aquecimento, foram testadas duas alternativas de isolamento destes elementos construtivos e simulados para averiguar o índice de conforto com a aplicação destas estratégias.

As estratégias de isolamento escolhidas foram:

- a) utilização de vidros duplos nas janelas das salas de aula;
- b) isolamento das paredes com 2 cm de lã de vidro e acabamento de gesso acartonado.

Os índices de conforto destas estratégias estão registrados na tabela 12.

Tabela 12 - Estratégias individuais indicadas pela análise dos fluxos térmicos

Classificação	Estratégias de climatização natural	Total de horas do ano			Horas ocupadas			Graus-hora de aquecimento	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas aquecimento	Horas ocupadas resfriamento
		Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto				
1	Vidros Duplos	3,12%	14,17%	82,72%	0,70%	20,83%	78,47%	688,60	1.513,30	264,59	546,38
2	Isolamento das paredes	2,69%	17,85%	79,45%	0,21%	27,76%	72,03%	604,76	1.993,85	223,51	785,40

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

As duas estratégias foram selecionadas para simulações conjuntamente para avaliar a sua eficácia e compará-las aos índices individuais, mesmo que somente a utilização de vidros duplos tenha aumentado o índice de conforto.

4.2.3 Análise do conforto térmico das estratégias de climatização natural com ventilação natural estimada simuladas individualmente

Os dutos enterrados e as chaminés solares foram simulados individualmente com ventilação natural estimada. Como relatado na metodologia também foram simulados em conjunto com ventilação natural estimada e sem ventilação pelas janelas.

Na simulação do projeto original listou-se as trocas de ar que acontecem no interior do prédio e foram ponderadas as médias de renovações de ar por hora resultando em uma média anual de 2,43 renovações de ar por hora nas salas de aula, 2,15 renovações de ar nas circulações e 0,72 renovações de ar nas áreas de banheiros. Estes dados foram utilizados para indicar as renovações de ar no item *Zone Ventilation Design Flow Rate* nas simulações com ventilação natural estimada.

Como a avaliação dos fluxos térmicos e do conforto térmico do projeto original demonstrou uma necessidade maior de refrigeração do que de aquecimento do prédio, optou-se em simular os dutos enterrados e chaminés solares somente como alternativa de refrigeração. Portanto foram registrados os índices de desconforto por calor na busca de diminuir este desconforto (Tabela 13).

Tabela 13 – Comparação das simulações individuais com ventilação natural estimada com dutos enterrados e chaminés solares conjuntamente

Estratégias indicadas pelo conforto com Ventilação Natural Estimada	Janelas	Total de horas do ano	Horas ocupadas	Graus-hora de aquecimento	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas aquecimento	Horas ocupadas resfriamento
		Desconforto por calor	Desconforto por calor				
Dutos enterrados vazão 0,4251m³/s	Abertas Temp. 25°	5,40%	5,54%	13.436,45	648,94	4.792,89	306,74
Chaminé solar 0,9m largura	Abertas Temp. 25°	6,22%	6,41%	12.800,33	784,38	4.572,06	369,90
Chaminé solar 0,9m largura + Dutos enterrados vazão 0,4251m³/s	Abertas Temp. 25°	6,08%	6,27%	12.982,01	753,59	4.634,51	355,45
Chaminé solar 0,9m largura + Dutos enterrados vazão 0,4251m³/s	Fechadas	7,20%	8,12%	5.045,48	972,61	1.958,89	388,15

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

O menor índice de desconforto por calor foi alcançado pelos dutos enterrados simulados com ventilação natural estimada. Com o objetivo de averiguar a eficiência destas técnicas simuladas com as janelas abertas e fechadas, selecionou-se também o conjunto dutos enterrados e chaminés solares simulados com as janelas fechadas para que fossem avaliados na análise comparativa.

4.3 ANÁLISE DO CONFORTO TÉRMICO DAS SOLUÇÕES COMPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO NATURAL

Esta seção se divide em três partes: a análise das estratégias de climatização natural compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos, a análise das estratégias de climatização natural compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico e a análise das estratégias de climatização natural compostas reunidas. A Figura 40 demonstra o método de seleção e as melhores estratégias conjuntas.

Figura 36 - Esquema do método de análise com as melhores soluções



Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

4.3.1 Análise das estratégias de climatização natural compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos

Os fluxos térmicos avaliados no projeto original indicaram os fechamentos transparentes como principais locais de ganho de calor dentre os que poderiam ser ajustados. Depois destes os fechamentos opacos verticais foi o elemento que mais absorveu calor no prédio. As estratégias simuladas, resultado desta análise, foram a utilização de vidros duplos nas janelas das salas de aula e utilização de isolamento de lã de rocha nas paredes. (Tabela 14).

Tabela 14 - Resultado da avaliação do conforto térmico das estratégias compostas indicadas pelos fluxos térmicos

Estratégias de climatização natural	Total de horas do ano			Horas ocupadas			Graus-hora de aquecimento	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas aquecimento	Horas ocupadas resfriamento
	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto				
Vidros Duplos Isolamento das paredes	2,34%	16,94%	80,72%	0,03%	27,48%	72,48%	520,20	1.890,33	193,40	767,73

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

As simulações demonstram que o desconforto por frio diminui em relação ao projeto original, porém o desconforto por calor aumenta resultando numa queda no conforto.

A soma destas estratégias não colabora com a melhoria no conforto térmico do prédio, portanto foi escolhido para ser simulado nas estratégias de simulação natural compostas reunidas somente a colocação de vidros duplos nas salas de aula.

4.3.2 Análise das estratégias de climatização natural compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico

As cinco estratégias com os maiores índices de conforto térmico foram simuladas em grupos para a análise da eficiência dos conjuntos conforme citado anteriormente. Os resultados destas simulações foram registrados na tabela 15.

Tabela 15 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico

Estratégias de climatização natural	Total de horas do ano			Horas ocupadas			Graus-hora de aquecimento	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas aquecimento	Horas ocupadas resfriamento
	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto				
Sombr. c/ veg. Oeste - Leste Absortância (parede)	6,10%	9,14%	84,76%	3,13%	12,50%	84,36%	1.242,62	897,29	440,58	329,31
Sombr. c/ veg. Oeste - Leste Absortância (parede)										
Inércia térmica	6,12%	7,99%	85,89%	2,79%	10,76%	86,45%	1.194,59	708,26	414,94	282,58
Sombr. c/ veg. Oeste - Leste Absortância (parede)										
Inércia térmica										
Sombr. c/ veg. Norte perpendicular Ventilação cruzada	5,67%	7,21%	87,11%	2,23%	9,68%	88,09%	1.118,77	622,85	385,66	258,35

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

O resultado mostra que o somatório das cinco alternativas é mais eficiente que as alternativas individuais. O conjunto teve um resultado no índice de conforto para a edificação com 88,09%, 10,59 pontos percentuais acima do índice de conforto térmico simulado no prédio original. O índice de desconforto por calor diminuiu de 21,63% nas horas ocupadas para 9,68% e o índice de desconforto por frio subiu de 0,87% para 2,23%.

4.3.3 Análise das estratégias climatização natural compostas reunidas

Esta simulação reúne a estratégia indicada pelos fluxos térmicos, vidros duplos janelas das salas de aula, somadas às estratégias indicadas pela avaliação do conforto térmico, sombreamento com vegetação nas fachadas leste e oeste, pintura branca nas paredes laterais para diminuição da absorvância solar, aumento da inércia térmica com utilização de parede dupla de tijolos maciços, sombreamento com vegetação perpendicular a fachada norte e ventilação cruzada com colocação de janelas nas circulações.

A tabela 16 mostra os resultados desta simulação.

Tabela 16 - Estratégias climatização natural compostas reunidas

	Total de horas do ano			Horas ocupadas			Graus-hora de aquecimento	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas aquecimento	Horas ocupadas resfriamento
	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto	Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto				
Vidros Duplos										
Sombr. c/ veg. Oeste - Leste										
Absortância (parede branca)										
Inércia térmica										
Sombr. c/ veg. Norte perpendicular										
Ventilação cruzada	5,47%	6,89%	87,64%	1,95%	9,47%	88,58%	1.063,58	594,35	374,10	251,58

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA

Esta seção compara os resultados obtidos quando simuladas as estratégias compostas em conjunto (Figura 37).

Figura 37 - Esquema da análise comparativa

ESTRATÉGIAS COMPOSTAS INDICADAS PELA AVALIAÇÃO DOS FLUXOS TÉRMICOS SOMADOS AS CHAMINÉS SOLARES E DUTOS ENTERRADOS	Com ventilação natural estimada	Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s)
		Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s) e chaminé solar (0,90cm)
	Sem ventilação natural pela esquadrias	Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s)
		Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s) e chaminé solar (0,90cm)
ESTRATÉGIAS COMPOSTAS INDICADAS PELA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO SOMADAS AS CHAMINÉS SOLARES E DUTOS ENTERRADOS	Com ventilação natural estimada	Sombr. c/ veget. Oeste - Leste, absortância (branca), inércia térmica, sombr. /m veget. Norte perpendicular e ventilação cruzada c/ Dutos enterrados (0,4251m³/s)
		Sombr. c/ veget. Oeste - Leste, absortância (branca), inércia térmica e sombr. c/ veget. Norte perpendicular c/ Dutos enterrados (0,4251m³/s) e chaminé solar (0,90cm)
	Sem ventilação natural pela esquadrias	Sombr. c/ veget. Oeste - Leste, absortância (branca), inércia térmica, sombr. /m veget. Norte perpendicular e ventilação cruzada c/ Dutos enterrados (0,4251m³/s)
		Sombr. c/ veget. Oeste - Leste, absortância (branca), inércia térmica e sombr. c/ veget. Norte perpendicular c/ Dutos enterrados (0,4251m³/s) e chaminé solar (0,90cm)
ESTRATÉGIAS COMPOSTAS INDICADAS PELA AVALIAÇÃO DOS FLUXOS TÉRMICOS SOMADOS AO CONFORTO TÉRMICO SOMADOS AS CHAMINÉS SOLARES E DUTOS ENTERRADOS	Com ventilação natural estimada	Sombr. c/ veget. Oeste-Leste, absortância (branca), inércia térmica, sombr. c/ veget. Norte perpendicular e ventilação cruzada c/Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s)
		Sombr. c/ veget. Oeste-Leste, absortância (branca), inércia térmica e sombr. c/ veget. Norte perpendicular c/ Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s) e chaminé solar (0,90cm)
	Sem ventilação natural pela esquadrias	Sombr. c/ veget. Oeste-Leste, absortância (branca), inércia térmica e sombr. c/ veget. Norte perpendicular e ventilação cruzada c/Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s)
		Sombr. c/ veget. Oeste-Leste, absortância (branca), inércia térmica e sombr. c/ veget. Norte perpendicular c/ Salas de aula c/ vidro duplo e Dutos enterrados (0,4251m³/s) e chaminé solar (0,90cm)

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

A análise comparativa afere o potencial de resfriamento das alternativas em conjunto pois simula, juntamente com as estratégias de simulação natural calculada, as estratégias de simulação natural estimada (dutos enterrados e chaminés solares). A Tabelas 17 mostra os resultados da melhor alternativa composta indicada pela avaliação dos fluxos térmicos com as melhores estratégias de resfriamento (dutos enterrados e chaminés solares).

O desconforto por calor se encontra abaixo dos resultados encontrados no projeto original, porém acima dos resultados alcançados pelos dutos enterrados simulados individualmente. Quando acrescentamos os vidros duplos ao projeto com chaminés solares e dutos enterrados o desconforto por calor diminui de 8,12% para 7,94%.

A Tabela 18 mostra os resultados da melhor alternativa composta indicada pela avaliação do conforto térmico com as melhores estratégias de resfriamento.

Os percentuais de desconforto por calor estão abaixo dos registrados em todas as simulações anteriores atingindo índices abaixo dos 5% e graus-hora de resfriamento abaixo de 500.

Tabela 17 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos somadas as chaminés solares e dutos enterrados

Estratégias de climatização natural	Total de horas do ano	Horas ocupadas	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas resfriamento
	Desconforto por calor	Desconforto por calor		
Com ventilação natural estimada				
Salas de aula c/ vidro duplo	5,53%	5,61%	669,11	324,53
Dutos enterrados (0,4251m³/s)				
Salas de aula c/ vidro duplo	6,13%	6,30%	776,18	375,79
Dutos enterrados (0,4251m³/s)				
Chaminé solar (0,90cm)				
Sem ventilação natural pela esquadrias				
Salas de aula c/ vidro duplo	6,56%	7,35%	884,81	884,81
Dutos enterrados (0,4251m³/s)				
Salas de aula c/ vidro duplo	7,17%	7,94%	983,08	398,97
Dutos enterrados (0,4251m³/s)				
Chaminé solar (0,90cm)				

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Tabela 18 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação do conforto térmico somadas as chaminés solares e dutos enterrados - 100% de ocupação

Estratégias de climatização natural	Total de horas do ano	Horas ocupadas	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas resfriamento
	Desconforto por calor	Desconforto por calor		
Com ventilação natural estimada				
Sombr. c/ veget. Oeste-Leste	4,20%	5,12%	481,47	219,15
Absortância (Parede branca)				
Inércia térmica				
Sombr. c/ veget. Norte perpendicular	4,50%	4,32%	512,63	252,33
Dutos enterrados (0,4251m³/s)				
Chaminé solar (0,90cm)				
Sem ventilação natural pela esquadrias				
Sombr. c/ veget. Oeste-Leste	4,06%	4,01%	449,05	220,53
Absortância (Parede branca)				
Inércia térmica				
Sombr. c/ veget. Norte perpendicular	4,57%	5,40%	522,47	240,85
Salas de aula c/ vidro duplo				
Dutos enterrados (0,4251m³/s)				
Chaminé solar (0,90cm)				

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Por último, a Tabela 19 mostra os resultados da melhor alternativa composta indicada pela avaliação dos fluxos térmicos somada com a melhor alternativa composta indicada pela avaliação do conforto térmico somada com as melhores estratégias de resfriamento. Estas últimas simulações, agrupando todos os tipos de estratégias de climatização natural estudadas, mostram as melhores situações de eficiência em relação ao desconforto por frio nas salas de aula atingindo percentuais abaixo dos 4% e um número de horas ocupadas com resfriamento entre 265,65 e 220,89.

Tabela 19 - Estratégias compostas indicadas pela avaliação dos fluxos térmicos somadas ao conforto térmico e somados as chaminés solares e dutos enterrados - 100% de ocupação

Estratégias de climatização natural	Total de horas do ano	Horas ocupadas	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas resfriamento
	Desconforto por calor	Desconforto por calor		
Com ventilação natural estimada				
Sombr. c/ veget. Oeste-Leste				
Absortância (Parede branca)				
Inércia térmica				
Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
Salas de aula c/ vidro duplo	4,08%	3,97%	463,56	232,50
Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
Sombr. c/ veget. Oeste-Leste				
Absortância (Parede branca)				
Inércia térmica				
Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
Salas de aula c/ vidro duplo	4,62%	4,49%	528,66	265,65
Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
Chaminé solar (0,90cm)				
Sem ventilação natural pela esquadrias				
Sombr. c/ veget. Oeste-Leste				
Absortância (Parede branca)				
Inércia térmica				
Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
Salas de aula c/ vidro duplo	4,22%	5,12%	478,69	220,89
Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
Sombr. c/ veget. Oeste-Leste				
Absortância (Parede branca)				
Inércia térmica				
Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
Salas de aula c/ vidro duplo	4,55%	5,29%	523,32	245,44
Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
Chaminé solar (0,90cm)				

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

4.5 RESUMO DAS ANÁLISES DE CONFORTO TÉRMICO E DESCONFORTO POR CALOR

A tabela 20 mostra a classificação das melhores estratégias de conforto térmico analisadas neste trabalho.

Tabela 20 - Resumo dos resultados de conforto térmico

	Classificação	Estratégias de climatização natural	Horas ocupadas		
			Desconforto por frio	Desconforto por calor	Conforto
Estratégias de climatização natural em conjunto	1	Vidros Duplos	1,95%	9,47%	88,58%
		Sombr. c/ veg. Oeste - Leste			
		Absortância (parede branca)			
		Inércia térmica			
		Sombr. c/ veg. Norte perpendicular			
		Ventilação cruzada			
	2	Sombr. c/ veg. Oeste - Leste	2,23%	9,68%	88,09%
		Absortância (parede branca)			
		Inércia térmica			
		Sombr. c/ veg. Norte perpendicular			
		Ventilação cruzada			
	3	Sombr. c/ veg. Oeste - Leste	2,79%	10,76%	86,45%
Absortância (parede branca)					
Inércia térmica					
4	Sombr. c/ veg. Oeste - Leste	3,13%	12,50%	84,36%	
	Absortância (parede branca)				
Estratégias de climatização natural individuais	5	Sombr. veget. Oeste - Leste	2,09%	14,59%	83,32%
	6	Absortância (Parede branca)	1,85%	15,78%	82,38%
	7	Inércia Térmica	0,70%	19,23%	80,08%
	8	Sombr. veget. Norte perp.	1,39%	18,70%	79,90%
	9	Ventilação cruzada	0,87%	20,13%	79,00%
	10	Vidros Duplos	0,70%	20,83%	78,47%
PROJETO ORIGINAL			0,87%	21,63%	77,50%

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

As estratégias de climatização natural quanto somadas são mais eficazes para a melhoria do conforto térmico que as estratégias de climatização natural aplicadas a edificação individualmente. As estratégias com o objetivo de sombrear o ambiente são as mais eficazes no controle do calor proveniente da radiação solar. O isolamento térmico em ambientes com uma geração de calor interno muito elevado somente é eficaz se combinado com estratégias de ventilação natural. Essa demonstra-se eficiente na expulsão do calor sensível diminuindo a temperatura ambiente.

A Tabela 21 registra a eficácia dos dutos enterrados para o resfriamento da edificação. Instalados sem nenhuma outra estratégia já tem um percentual de desconforto por calor muito baixo, atingindo 5,40% para todas as horas do ano e 5,54% para as horas ocupadas. Quando associados às demais estratégias de sombreamento, isolamento térmico, diminuição da absorvância solar e aumento da inércia térmica a eficácia do conjunto destas ações se amplia atingindo patamares de 3,97% de desconforto por calor.

Tabela 21 - Resumo do desconforto por calor com ventilação natural

Classificação		Total de horas do ano	Horas ocupadas	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas resfriamento
		Desconforto por calor	Desconforto por calor		
1	Sombr. c/ veget. Oeste-Leste	4,08%	3,97%	463,56	232,50
	Absortância (Parede branca)				
	Inércia térmica				
	Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
	Salas de aula c/ vidro duplo				
	Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
2	Sombr. c/ veget. Oeste-Leste	4,20%	5,12%	481,47	219,15
	Absortância (Parede branca)				
	Inércia térmica				
	Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
	Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
4	Salas de aula c/ vidro duplo	5,53%	5,61%	669,11	324,53
	Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
3	Dutos enterrados vazão 0,4251m ³ /s	5,40%	5,54%	648,94	306,74

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

Registra-se na Tabela 22 a ventilação entre chaminés solares e dutos enterrados sem a abertura das janelas. Estes dados resultam de simulações sem a indicação de renovações de ar pelas janelas das salas de aula. Nota-se a eficiência dos conjuntos sem ventilação natural

estimada no resfriamento do edifício, pois eles mantêm um baixo índice de desconforto por calor mesmo sem somar as informações de renovações de ar indicadas para as janelas.

Tabela 22 - Resumo dos resultados de desconforto por calor (dutos enterrados e chaminés solares)

Classificação		Total de horas do ano	Horas ocupadas	Graus-hora de resfriamento	Horas ocupadas resfriamento
		Desconforto por calor	Desconforto por calor		
1	Sombr. c/ veget. Oeste-Leste			523,32	245,44
	Absortância (Parede branca)				
	Inércia térmica				
	Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
	Salas de aula c/ vidro duplo				
	Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
	Chaminé solar (0,90cm)				
2	Sombr. c/ veget. Oeste-Leste			522,47	240,85
	Absortância (Parede branca)				
	Inércia térmica				
	Sombr. c/ veget. Norte perpendicular				
	Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
	Chaminé solar (0,90cm)				
3	Salas de aula c/ vidro duplo			983,08	398,97
	Dutos enterrados (0,4251m ³ /s)				
	Chaminé solar (0,90cm)				
4	Chaminé solar 0,9m largura			972,61	388,15
	Dutos enterrados vazão 0,4251m ³ /s				

Fonte: (Produzido pelo pesquisador, 2018).

5 CONCLUSÕES

A pesquisa analisou 13 estratégias de climatização natural indicadas pela carta climática de Santa Maria (FLORES, 2014), para a melhoria do conforto térmico do prédio de salas de aula da Universidade Federal de Santa Maria, no Campus de Cachoeira do Sul, na zona bioclimática 2 por meio de simulações térmicas no programa EnergyPlus.

Os fluxos térmicos analisados no projeto original mostram que o calor gerado pelas pessoas é o maior responsável por elevar a temperatura do prédio, seguido do calor gerado pelos equipamentos e iluminação. Os fechamentos opacos verticais e os fechamentos transparentes são responsáveis por ganhos significativos no verão e perdas no inverno. No pavimento térreo destaca-se ainda as perdas por condução no piso e no pavimento superior as perdas na cobertura.

Quanto à avaliação do conforto térmico do prédio original verificou-se um índice de 77,50% de conforto, 21,63% de desconforto para o calor e 0,87% de desconforto para o frio. Estes dados indicaram que as estratégias de resfriamento são mais importantes para que o conforto térmico tenha índices melhores. Importante destacar que os meses de férias, janeiro e fevereiro, não foram computados.

As estratégias de climatização natural foram avaliadas individualmente considerando as condições de conforto das zonas térmicas e os fluxos térmicos dos elementos da edificação. Destacam-se nesta avaliação: o sombreamento com vegetação das fachadas leste e oeste, a utilização de tijolos maciços duplos, utilização de ventilação cruzada e o uso de cores claras nos fechamentos opacos. A utilização de sombreamento com vegetação nas fachadas leste e oeste (*Wisteria floribunda*), destacou-se como a melhor técnica de climatização natural alcançando um índice de conforto de 83,32%, 14,59% de desconforto por calor e 2,09% de desconforto por frio. A melhor estratégia de resfriamento do prédio foi a ventilação por dutos enterrados, pois quando simulados na edificação demonstraram um índice de desconforto por calor de 5,54% nas horas ocupadas.

Posteriormente as estratégias foram analisadas em conjuntos indicados pela análise dos fluxos térmicos e pela avaliação do conforto térmico. Nestas simulações agrupadas concluiu-se que o somatório das estratégias de climatização natural aumenta o conforto no prédio de salas de aula. Quanto à eficácia, concluiu-se que o melhor índice de conforto térmico foi atingido quando se acrescentou ao projeto original as técnicas de sombreamento com vegetação nas fachadas leste e oeste, pintura branca nos fechamentos opacos (diminuição da absorvância), utilização de tijolos maciços duplos (aumento da inércia térmica), sombreamento com

vegetação perpendicular a fachada norte, ventilação cruzada e vidros duplos nas janelas das salas de aula. O índice de conforto obtido por essa composição foi de 88,58%, registrou 9,47% de desconforto por calor e 1,95% de desconforto por frio. Quando os dutos enterrados foram agrupados a essas estratégias que alcançaram os melhores índices de conforto o desconforto por calor diminuiu para 3,97% atingindo apenas 463,56 graus-hora de resfriamento em 232,5 horas ocupadas com resfriamento.

Considera-se cumprido o objetivo principal deste trabalho porque conseguiu indicar a melhor estratégia individual de climatização natural e o melhor conjunto de técnicas para a melhoria do conforto térmico do prédio de salas de aula da UFSM-CS, assim como mostrar a melhor estratégia de resfriamento para este tipo de edificação na zona bioclimática 2.

Os resultados desta pesquisa permitem que se recomende aos projetistas a utilização das seguintes estratégias para climatização natural neste tipo de edificação:

- a) o sombreamento com vegetação decídua porque adequa-se as variações das estações, sombreando o edifício no verão e permitindo a passagem da radiação solar no inverno, característica importante para projetos na zona bioclimática 2;
- b) inércia térmica elevada para materiais de fechamento juntamente com estratégias de ventilação cruzada;
- c) acabamentos externos com baixa absorvância, em especial em grandes painéis opacos;
- d) dutos enterrados para resfriamento da edificação porque é a alternativa mais eficaz para a refrigeração natural neste tipo de edificação;
- e) o somatório de alternativas de climatização natural auxilia no controle da temperatura de conforto e as estratégias devem ser deixadas ao controle do usuário sempre que possível para que ele possa adequá-las as suas necessidades, em especial quando a população é muito variável.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA OUTROS TRABALHOS DE PESQUISA

Com base no trabalho realizado pode-se sugerir como novos estudos em torno do tema:

- a) estudar alternativas de sombreamento com vegetação distante do prédio, permitindo uma melhor ventilação, pois o fato da vegetação estar muito próxima suscitou a hipótese de que ocorra um isolamento do calor quando a vegetação está com o PTS baixo (verão);
- b) verificar o comportamento das estantes de luz com a utilização de vidros seletivos, isolantes e duplos, na parte superior das esquadrias;

- c) simular variações de paredes com alta inércia térmica com estratégias de ventilação cruzada;
- d) calcular a economia de energia com a utilização de estratégias de climatização natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta. 2004.

_____. **ANSI/ASHRAE 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2010.

_____. **ANSI/ASHRAE 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2013.

ALVES, A. B. M. **Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo**. 2014. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curitiba, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - desempenho. parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 16401**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projetos das instalações. 2008a.

ASTROREI. Disponível em: <<http://astrorei.blogspot.com.br/2011/11/parede-de-trombe.html>> Acesso em: 15 out. 2017.

BARBOSA, M. J. **Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares**. 1997. 303 f. Tese (Doutorado Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1997.

BATIZ, C. E.; GOEDERT, J.; MORSCH, J. J.; KASMIRSKI J. P.; VENSKE, R. Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. **Production**, vol. 19, núm. 3, pp. 477-488, set./dez., 2009, pp. 477-488. Associação Brasileira de Engenharia de Produção, São Paulo, Brasil.

BRASIL. Manual para aplicação do RTQ-C e RAC-C. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS; PROCEL, 2009. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/publica/manuais>> Acesso em: 1 out. 2017.

BRASIL. Ministério da Educação. **FÓRUM NACIONAL DE EDUCAÇÃO (FNE)** Coord.: Francisco das Chagas Fernandes. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <<http://fne.mec.gov.br/images/doc/DocumentoFina240415.pdf>>. Acesso em 24 de ago. 2017.

BRASIL. Secretaria de logística e tecnologia da informação. INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 2, DE 4 DE JUNHO DE 2014. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 de junho de 2014. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=05/06/2014&jornal=1&pagina=102&totalArquivos=164>> Acesso em: 11 out. 2017.

BROWN, G. Z.; DEKAY, M. **Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

BRUM, R. S. **Teoria construtal e desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar**. 2016. 108 f. Tese. (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2016.

CAMARGO, M. **Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2**. 2017. 105 p. Dissertação. (Mestrado e Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2017.

CAVALCANTI, F. A. M. S. **Chaminé solar como alternativa para incrementar a ventilação natural em espaços internos**. 2010. 118 p. Dissertação. (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP, 2010.

CHRISTMANN, L. L. **Dimensionamento e avaliação do potencial de arrefecimento de edificação de ensino através de ventilação por efeito chaminé em Santa Maria-RS**. 2015. 162 p. Dissertação. (Mestrado e Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2015.

COSTA, V. A. C. **Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab**. 2017. 237 p. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) . Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2017.

CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro comum**. 2a ed. Tradução de Our common future. 1a ed. 1988. Rio de Janeiro : Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991

CUNHA, E. G. (org.); ZECHMEISTER, D.; MELO, E. Q.; MASCARÓ, J. J.; VASCONCELOS, L.; FRANDOLOSO, M. A. L. **Elementos de arquitetura de climatização natural: método projetual buscando a eficiência energética nas edificações**. UPF, 2004 149p.

De DEAR, R.; BRAGER, G.S., **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. ASHRAE Trans., V.104(1a), pp. 145-167, 1998.

DE VECCHI, R. **Condições de conforto térmico e aceitabilidade da velocidade do ar em salas de aula com ventiladores de teto para o clima de Florianópolis/SC**. 2011. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina,

Florianópolis, 2010.

DORNELLES, K. A. **Estudo de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos, SP.** 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Inércia térmica, conforto e consumo de energia em edificações na cidade de São Carlos, SP. **VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e III Encontro Latino Americano sobre Conforto no Ambiente Construído.** Curitiba, v. 7, p. 369-376, nov., 2003. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2003/ENCAC03_0369_376.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2018.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de edificações. In: **Congresso Internacional de Tintas**, v. 10. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.fapesp.br/arquivos/artigo_dornelles_roriz.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2018.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference** – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013. Disponível em: <<https://energyplus.net/>> Acesso em: 3 mai. 2017.

FAGUNDES, S. F. **Simulação termoenergética e proposta de melhoria em espaços de ensino e aprendizagem: estudo de caso campus Unisinos São Leopoldo.** 2016. 82 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort – Analysis and application in engineering.** Copenhagen, 1970.

FERNANDES, J. T. **Qualidade da iluminação natural e o projeto arquitetônico: a relação da satisfação do usuário quanto à vista exterior da janela e a percepção de ofuscamento.** 2016. 344 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

FIGUEIREDO, C. M.; FROTA, A. B. Ventilação Natural para Conforto Térmico em Edifícios de Escritórios – Avaliação com Modelos Adaptativos. In: Seminário Internacional Nutau, 7. 2008, São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo/SP: Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://www.usp.br/nutau/CD/149.pdf>> Acesso em: 23 de ago. 2017

FLORES, M. G. **Geração da base climática de Santa Maria - RS – Para Análise de Desempenho Térmico e Eficiência Energética de Edificações.** 2014, 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Preservação Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

FRANDOLOSO, M. A. L. **Critérios de projeto para escolas fundamentais bioclimáticas.** 2001. 233 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

GARLET, L. **Otimização do comportamento térmico de edificações industriais: estudo de caso em indústria metal mecânica na zona bioclimática brasileira 2**. 2016. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Preservação Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

GARLET, L; SOARES, R. M. D. **Apostila EnergyPlus – Módulo básico**: apostila. Santa Maria: Arq3E Arquitetura Bioclimática Eficiência Energética, 2018. 28 p.

GIVONI, B. **Climate Considerations in Building and Urban Design**. New York, 1992. John Wiley & Sons. 464 p.

GOOGLE. **Google Earth website**. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 10 mar 2017.

GRANDJEAN, E. **Manual de Ergonomia: adaptando o trabalho ao homem**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 1998. 338 p.

GUERRA, M. E. A.; LOPES, A. F. A. Arquitetura verde: contribuições a partir da exemplificação de tipologias vinculadas à sustentabilidade urbana. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes – ANAP – Periódico técnico científico – cidades verdes – V.3 N. 5**, 2015. Disponível em: <https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/cidades_verdes/article/view/951>. Acesso em: 5 out. 2017.

HERNÁNDEZ, A. (coord.); FARIÑA, J.; FERNÁNDEZ, V.; GÁLVEZ, M. Á.; URRUTIA, N. **Manual de Desenho Bioclimático Urbano. Manual de Orientações para a Elaboração de Normas Urbanísticas**. Bragança, Portugal: Instituto Politécnico de Bragança, 2013. 284 p.

HUMPHREYS, M. A., **Field studies of thermal comfort compared and applied. In: Building Research Establishment Current Paper. 75/76**. Watfort. UK.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **RTQ-R: Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2012.

IZARD, J; GUYOT, A. **Arquitetura bioclimática**. Barcelona, Espanha: Gustavo Gili, 1980. 191 p.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2016.

KWOK, Alison G.; GRONDZIK, Walter T. **Manual de arquitetura ecológica**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 422 p.

LABORATÓRIO, DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Analysis SOL-AR**. 2013. Disponível em: < <http://www.labee.ufsc.br/downloads/software/analysis-sol-ar>>. Acessado em: 15 nov. 2018.

LACCHINI, A. S. **Desempenho termoenergético de edificações industriais**. 2010. p. 206 Dissertação: (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Livro - Eficiência Energética na Arquitetura.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Livro-EficienciaEnergeticaNaArquitetura.pdf)>. Acesso em: 01 de mar. 2017.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. **Casa Eficiente: simulação computacional do desempenho termo-energético**. v. 4, 53 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010 Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_IV_WEB.pdf>. Acesso em: 01 dez 2018.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. P.; GOULART, S.; DE VECCHI R. **Conforto e stress térmico**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4200_apostila%202011.pdf_2.pdf> Acesso em: 15 ago. 2017.

LINDENMAIER, D. S.; BUDKE, J. C. Florística, diversidade e distribuição espacial das espécies arbóreas em uma floresta estacional na bacia do rio Jacuí, sul do Brasil. In: **PESQUISAS, BOTÂNICA**, n. 57, p. 193-216, 2006. São Leopoldo/RS. Instituto Anchietao de Pesquisas, 2006. Disponível em: <<http://www.anchietano.unisinos.br/publicacoes/botanica/botanica57/artigo9.pdf>> Acesso em: 7 nov. 2017.

MANHÃES, Gabriela S.; ARAÚJO, Ronaldo S. Sustentabilidade nas construções. **Perspectiva On Line: hum & sociais aplicadas**, Campus dos Goytacazes, v.4 n. 11, p. 15 – 24. 2014. Disponível em: <http://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/humanas_sociais_e_aplicadas/article/viewFile/555/500>. Acesso em: 15 out. 2017.

MANSILHA, R. B. **Análise da disponibilidade de iluminação natural e artificial em salas de aula de instituição pública de ensino superior**. 2013. 188 p. Dissertação: (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MENDES, J. U. L. et al. Determinação da difusividade térmica de um compósito natural visando classifica-lo como isolante térmico. In: **Anais do 20º CBECIMAT–Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Joinville/SC. 2012. <Disponível em: file:///C:/Users/UFSM-CS/Downloads/211-007%20(3).pdf>. Acesso em: 15 nov. 2018.

MILAN, V. B. **Desempenho térmico: análise de uma edificação escolar padrão pro infância instalada no município de Camaquã**. 2015. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/138337/000989627.pdf?sequence=1>> Acesso em: 15 set. 2017.

NEVES, L. O. **Arquitetura bioclimática e a obra de Severiano Porto: estratégias de ventilação**. 2006. 222 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de

Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

NEVES, L. O. **Chaminé solar como elemento indutor de ventilação natural em edificações**. 2012. 158 p. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

NEVES, L. O.; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. In: **Ambiente Construído**: Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 177-192, Mar. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000100012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 05 fev. 2019.

NEVES, L. O.; SILVA, F. M. Análise paramétrica de chaminés solares visando a otimização de desempenho em climas típicos do território brasileiro. In: **Ambiente Construído**: Porto Alegre v. 17, n. 1, p. 163-182, jan./mar. 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ac/v17n1/1678-8621-ac-17-01-0163.pdf>> Acesso em: 20 set. 2017.

NICO-RODRIGUES, E. A.; ALVAREZ C. E.; SANTO, A. D.; PIDERIT, M. B. Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. In: **Ambiente Construído**: Porto Alegre v. 15, n.2, p. 7-23, abr./jun. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ac/v15n2/1678-8621-ac-15-02-0007.pdf>> Acesso em: 20 set. 2017.

OLGYAY, V. **Design with climate**. New Jersey, USA. Princeton University Press, 1963.

PAPST, A. L. **Uso de Inercia Térmica no Clima Subtropical - estudo de caso em Florianópolis - SC**. 1999. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

PEREIRA, H. A. C.; MELO, A. P.; VERSAGE, R.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – Versão 8.0**: manual. Florianópolis, Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013, 56 p.

PLACO SAINT-GOBAIN. 2018. Disponível em: <<https://www.placo.com.br>>. Acesso em: 02 dez. 2018.

PROINFRA. Pró-Reitoria de Infraestrutura. **Projeto arquitetônico dos prédios básicos da UFSM-CS**. Santa Maria. 2017.

RACKES, A.; FONSECA, R. W.; BECK, E.; LAMBERTS, R. Avaliação do potencial de conforto térmico em escolas naturalmente ventiladas. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** São Paulo/SP. Universidade de São Paulo, 2015. P.2-10. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/encac/files/2015/topico5artigo17.pdf>> Acesso em: 15 nov. 2018.

RUSSI, M.; VETTORAZZI, E.; SANTOS, J. C. P.; ZÓFOLI, G. R.; SOARES, R. M. D. Estratégias construtivas na busca de conforto térmico e eficiência energética em edificações unifamiliares de interesse social nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3 brasileiras. **Revista de Arquitetura da IMED**, v. 1, n.2, p. 113-121, 2012. Disponível em:

<file:///C:/Users/SUPORTE/Downloads/414-1550-1-PB%20(1).pdf> Acesso em: 15 out. 2017.

SANTOS, J. C. P. **Desempenho térmico e visual de elementos transparentes frente à radiação solar**. Tese. 2002. (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2002.

SANTOS, P. K.; COSTA, G. M.; BARROS, B. R. Conforto ambiental em instituições de ensino: análise do campus do sertão da UFAL. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceio/AL. **Anais...** São Paulo/SP: Universidade de São Paulo, 2014. p. 866-874. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_552.pdf> Acesso em: 25 out. 2017.

SCHERER, M. J. **Cortinas verdes na arquitetura: desempenho no controle solar e na eficiência energética de edificações**. 2014. 187 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2014.

SCHERER, M. J; FEDRIZZI, B. M. Jardins verticais: potencialidades para o ambiente urbano. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, v. 2, n. 2, p. 49-61, 2014. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/relainep/article/view/37883>>. Acesso em: 28 de set. 2017.

SORGATO, M. J. **Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente**. 2009. 216 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2009.

SZOKOLAY, S. V. **Arquitectura solar realización y proyectos a escala mundial**. Madri: Blume, 1983.

TAVARES, C. R. G. **A ergonomia e suas contribuições para o processo de ensino-aprendizagem: uma análise das salas de aula do CEFET/RN**. 2000. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

TREICHEL, S. Z.; FREITAS, J. M. R.; DALBEM, R.; BELTRAME, C. M.; CUNHA, E. G. Discussão do desempenho da chaminé térmica como estratégia de ventilação natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção, 16., 2016, São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo/SP: Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2016. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac/2016/ENTAC2016_paper_66.pdf> Acesso em: 20 set. 2017.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37-58, out./dez. 2010. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/12110>> Acesso em: 5 nov. 2017.

TRIPOLI, R. (rel). **Relatório Rio+20**. Comissão de meio ambiente e desenvolvimento sustentável. 2013. Disponível em: <WWW.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1081500&filename=REL/2013+CMADS> Acesso em: 31 ago. 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, 2018. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-sol-ar>. Acessado em: 15 nov. 2018.

VAZ, J.; FERREIRA, D.; LUSO, E.; FERNANDES, S. R. **Exemplos de soluções bioclimáticas existentes na construção tradicional da região transfronteiriça norte de Portugal - Castela e Leão**. In: Congresso latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio. 2014. Santander, Espanha. Anais... REHABEND, 2014. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6056053>>. Acesso em 30 set. 2017.

VETTORAZZI, E.; RUSSI, M.; SANTOS, J. C. P.; A utilização de estratégias passivas de conforto térmico e eficiência energética para o desenvolvimento de uma habitação unifamiliar. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SUSTENTABILIDADE EM HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 1., 2010, Porto Alegre/RS. **Anais...** Porto Alegre/RS, 2010. Disponível em: < <http://w3.ufsm.br/geese/wp-content/uploads/2010/09/1.pdf>> Acesso em: 15 out. 2017.

VOLTANI, E. R.; LABAKI, L.C. Revisão da última versão da norma iso 7730 (2005). In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7. 2008. Fortaleza/CE. **Anais...** Porto Alegre/RS: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008. p.

XAVIER, A. A. P. **Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias – Teoria física aliada a estudos de campo**. 2000. 251 f. Tese (Doutorado Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

ANEXO 1 – CÁLCULO DOS DUTOS ENTERRADOS E CHAMINÉS SOLARES

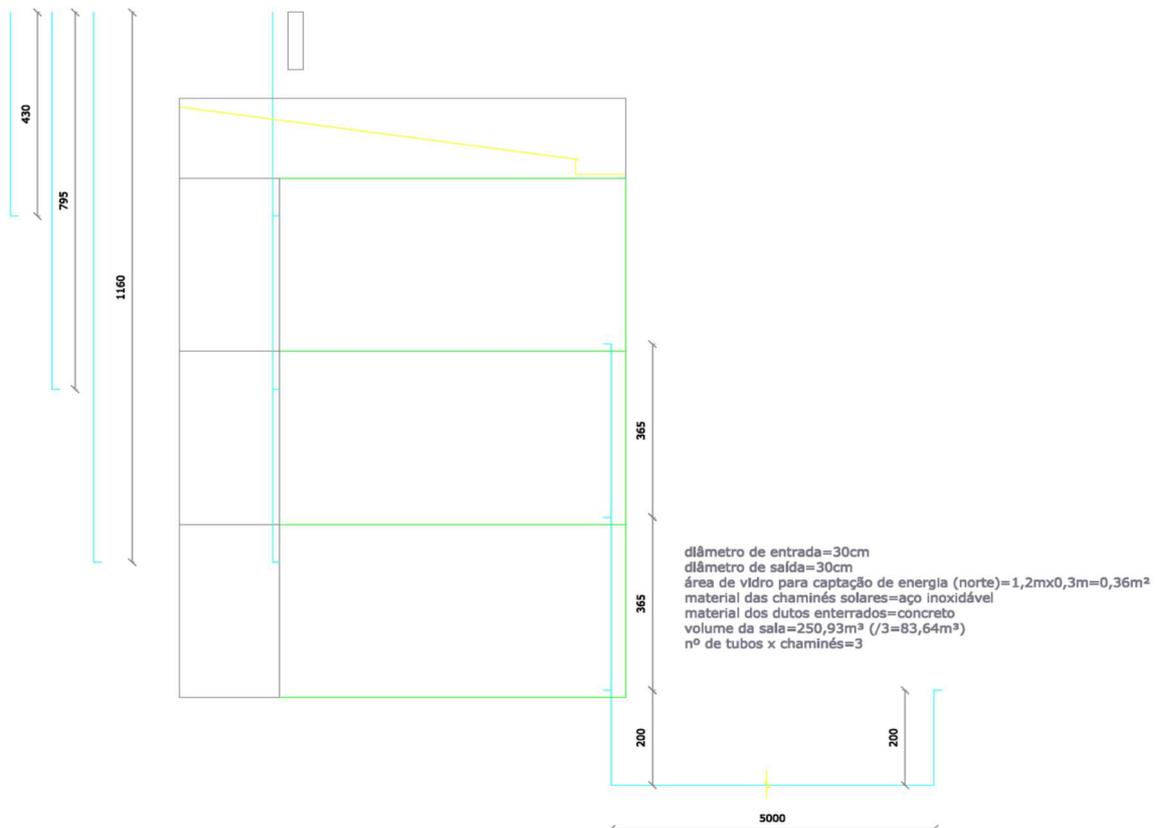
DIMENSIONAMENTO DE DUTOS PARA RESFRIAMENTO DE SALAS DE AULA

Objetivo: determinar o gradiente de pressão e a perda de carga entre a sucção e descarga de ar

Dados conhecidos:

- geometria dos dutos: cilíndrica (entrada) e retangular (saída);
- diâmetro interno dos dutos: 30 cm;
- Material: aço inox (dutos superficiais) e concreto (dutos enterrados);
- Área de vidro para captação de energia (norte): $1,2 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} = 0,36 \text{ m}^2$;
- Volume da sala: $250,93 \text{ m}^3$;
- Número de tubos \times chaminés: 3 unidades;
- Comprimento unitário dutos: descrição na Figura 1.

Figura 38 - Esquema de cálculo de dutos e chaminés.



Outras informações consideradas:

- a) Temperatura (T) do solo a 1,5 m de profundidade (dez e mar): 24°C (constante) [1];
- b) Radiação (G) solar média mensal (Dezembro): 22,1 MJ/m² [2];
- c) Radiação solar média mensal (Março): 16,0 MJ/m² [2];
- d) Temperatura ambiente média mensal (dezembro): 30,3°C;
- e) Temperatura ambiente média mensal (março): 28,5°C;
- f) Condutividade térmica (k) do aço inox AISI 316: 13,4 W/m.K [3];
- g) Condutividade térmica do concreto: 1,0 W/m.K [3];
- h) Calor específico do aço inox AISI 316: 468 J/kg.K [3];
- i) Calor específico do concreto: 780 J/kg.K [3];
- j) Absortividade (α) da parede escura: 0,80 [3];
- k) Emissividade (ϵ_r) da parede escura: 0,88 [3];
- l) Emissividade do aço inox: 0,17 [3];
- m) Constante de Stefan-Boltzmann (σ): $5,67 \times 10^{-8}$ W/m².K⁴;
- n) Rugosidade (ϵ) do aço inox AISI 316: 0,045 mm [4];
- o) Rugosidade do concreto: 3 mm [4];
- p) Velocidade do ar média externa aos dutos: 4 km/h = 1,1 m/s;
- q) Velocidade do ar média nos dutos (com sucção natural): 6 m/s = 21,6 km/h;
- r) Viscosidade do ar a T = 25°C: $18,2 \times 10^{-6}$ Pa.s;
- s) Viscosidade do ar a T = 40°C: $19,0 \times 10^{-6}$ Pa.s;
- t) Aceleração da gravidade: 9,8 m/s²;
- u) Espessura do duto de concreto: 3 cm;
- v) Espessura do duto de aço inox: 0,1 cm;
- w) Coeficiente convectivo do ar (h): 18 W/m².K [3];
- x) Umidade relativa média do ar (Ur): 60%;
- y) Radiação (G) solar incidente diária (Dez): 9004 W/m² (dia) ou 1134 W/m² (pico) [5];
- z) Constantes de perda de carga (k_i) [4]:
 - Ângulo de 90°: 1,5;
 - Tês: 2,0;

CÁLCULO DA TROCA TÉRMICA DO AR EM CADA DUTO ENTERRADO

Área unitária do duto:

$$A = 2 \pi R L = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 53 \text{ m} = 49,9 \text{ m}^2 \quad (1)$$

Taxa de transferência de calor por condução entre o solo (superfície externa do duto) e a superfície interna do duto (temperatura média):

$$\dot{q}_r = -k A \frac{dT}{dr} = -1 \frac{\text{W}}{\text{m.K}} \cdot 49,9 \text{ m}^2 \cdot \frac{(297-300)\text{K}}{0,03\text{m}} = 4990 \text{ W} \quad (2)$$

Temperatura do ar no final do duto:

$$dT = \frac{\dot{q}_r}{h A} = \frac{4990 \text{ W}}{18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 49,9 \text{ m}^2} = 5,6 \text{ K} \quad (3)$$

$$T_{ar} = 30,3^\circ\text{C} - 5,6^\circ\text{C} = 24,7^\circ\text{C} \quad (4)$$

CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM CADA DUTO ENTERRADO

Da carta psicrométrica:

$T = 30,3^\circ\text{C}$ e $U_r = 60\% \rightarrow U_a = 0,017 \text{ kg vapor d'água/kg ar seco}$ e $\rho = 1,13 \text{ kg/m}^3$.

$T = 24,7^\circ\text{C}$ e $U_a = 0,017 \text{ kg vapor d'água/kg ar seco} \rightarrow \rho = 1,16 \text{ kg/m}^3$.

$$Re = \frac{\rho_m v D}{\mu} = \frac{1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,3 \text{ m}}{18,2 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}} = 113.242 \quad (5)$$

Do diagrama de Moody:

$Re = 113.242$ e $\varepsilon/D = 0,01 \rightarrow f$ (fator de atrito) = 0,038

Perda de carga no duto enterrado:

$$h_{ld} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + k_f \frac{v^2}{2g} = 0,038 \frac{53 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} \frac{6^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 2 \cdot 1,5 \frac{6^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 17,8 \text{ m} \quad (6)$$

CÁLCULO DA QUEDA DE PRESSÃO EM CADA DUTO ENTERRADO

$$\Delta P = h_{ld} \rho_m g + (v_1^2 - v_2^2) g \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \right) + \rho_m g (z_1 - z_2) \quad (7)$$

Sendo $v_1 = v_2$ e $z_1 = z_2$:

$$\Delta P = 17,8 \text{ m} \cdot 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 200 \text{ Pa} \quad (8)$$

CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA DO AR EM CADA SALA

Informações:

- As dimensões de cada sala são: $6,875 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3,65 \text{ m}$;
- O ar escoa de forma ascendente (diagonalmente), numa área de seção transversal de $41,3 \text{ m}^2$;
- Serão 3 dutos enterrados distribuindo ar em 3 salas de aula;
- Vazão volumétrica de ar em cada sala: $0,424 \text{ m}^3/\text{s}$.

Portanto, a velocidade média de ar em cada sala será:

$$v_{sala} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot 0,3^2 \text{ m}^2 \cdot 6 \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{tubos}} \cdot \frac{3 \text{ tubos}}{3 \text{ salas}}}{\frac{41,3 \text{ m}^2}{\text{salas}}} = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (9)$$

Tempo de residência do ar na sala:

$$t = \frac{250,93 \text{ m}^3}{0,424 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 592 \text{ s} = 9,9 \text{ min} \quad (10)$$

Número de trocas de ar em cada sala:

$$N^{\circ} \text{ trocas} = \frac{60 \text{ min} / h}{9,9 \text{ min}} = 6,1 \text{ trocas} / h \quad (11)$$

CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA DO AR EM CADA DUTO ELEVADO (SAÍDA DA SALA)

Cálculo do diâmetro hidráulico (considerando duto retangular):

$$D_h = \frac{4 A_T}{P_m} = 4 \frac{0,09 \text{ m}^2}{1,2 \text{ m}} = 0,3 \text{ m}$$

Onde: A_T é a área de seção transversal e P_m é o perímetro do duto;

$$v_{duto,elevado} = \frac{\frac{0,424 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{3 \text{ dutos}}}{0,3^2 \frac{\text{m}^2}{\text{dutos}}} = 1,57 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (12)$$

GANHO DE ENERGIA TÉRMICA NA CHAMINÉ POR RADIAÇÃO

Cálculo do fluxo de calor irradiado até a superfície absorvedora considerando radiação média diária de 9004 W/m^2 durante 12 h/dia em dias normais no mês de dezembro:

$$\dot{q}''_{irradiação,média} = \alpha \cdot \dot{G} = 0,8 \cdot 9004 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot 12} = 600,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (13)$$

Cálculo do fluxo de calor irradiado até a superfície absorvedora considerando a máxima radiação (meio dia) de 1134 W/m^2 para dezembro [5]:

$$\dot{q}''_{irradiação,máxima} = \alpha \cdot G = 0,8 \cdot 1134 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 907,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (14)$$

Cálculo das temperaturas máxima e média atingidas na superfície absorvedora:

$$\dot{q}_s = \varepsilon \sigma T_s^4 \rightarrow T_s = \left(\frac{\dot{q}''_{irradiação,máxima}}{\varepsilon \cdot \sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{907,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{0,88 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}} \right)^{1/4} = 367 \text{ K} = 94^\circ \text{C} \quad (15)$$

$$\dot{q}_s = \varepsilon \sigma T_s^4 \rightarrow T_s = \left(\frac{\dot{q}''_{irradiação,média}}{\varepsilon \cdot \sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{600,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{0,88 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}} \right)^{1/4} = 331 \text{ K} = 58^\circ \text{C} \quad (16)$$

Considerando que a superfície absorvedora transfere 50% do calor para o aquecimento do ar:

$$\dot{q}_{transmitido,máximo} = 0,5 \cdot 907,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,36 \text{ m}^2 = 163,3 \text{ W} \quad (17)$$

$$\dot{q}_{transmitido,médio} = 0,5 \cdot 514,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,36 \text{ m}^2 = 92,6 \text{ W} \quad (18)$$

Considerando que o aquecimento do ar se dá por convecção:

$$\Delta T = \frac{\dot{q}_{\text{transmitido,máximo}}}{h A} = \frac{163,3 \text{ W}}{18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 0,36 \text{ m}^2} = 25,2 \text{ K} \quad (19)$$

$$\Delta T = \frac{\dot{q}_{\text{transmitido,médio}}}{h A} = \frac{92,6 \text{ W}}{5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 0,36 \text{ m}^2} = 14,3 \text{ K} \quad (20)$$

$$T_{\text{ar,saída,máxima}} = 30,3^\circ\text{C} + 25,2^\circ\text{C} = 55,5^\circ\text{C} \quad (21)$$

$$T_{\text{ar,saída,médio}} = 30,3^\circ\text{C} + 14,3^\circ\text{C} = 44,6^\circ\text{C} \quad (22)$$

CÁLCULO DA PERDA DE CARGA E DA QUEDA DE PRESSÃO EM CADA DUTO ELEVADO (SAÍDA DA SALA)

Da carta psicrométrica (usando dados médios):

$T = 44,6^\circ\text{C}$ e $U_a = 0,017 \text{ kg vapor d'água/kg ar seco} \rightarrow U_r = 29\%$ e $\rho = 1,08 \text{ kg/m}^3$.

$T = 30,3^\circ\text{C}$ e $U_r = 60\% \rightarrow U_a = 0,017 \text{ kg vapor d'água/kg ar seco}$ e $\rho = 1,13 \text{ kg/m}^3$.

$$Re = \frac{\rho_m v D}{\mu} = \frac{1,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,57 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,3 \text{ m}}{19 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 27.392 \quad (23)$$

Do diagrama de Moody:

$Re = 27.392$ e $\varepsilon/D_h = 0,00015 \rightarrow f = 0,024$

Para o 1º andar:

$$h_{ld} = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} + k_l \frac{v^2}{2g} = 0,024 \frac{11,6 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} \frac{1,57^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1 \cdot 1,5 \frac{1,57^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,31 \text{ m} \quad (24)$$

Usando a Equação (7) e sendo $v_1 = v_2$:

$$\Delta P = 0,31 \text{ m} \cdot 1,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 1,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 11,6 \text{ m} = 128 \text{ Pa} \quad (25)$$

Para o 2º andar:

$$h_{ld} = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} + k_l \frac{v^2}{2g} = 0,024 \frac{7,95 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} \frac{1,57^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1 \cdot 1,5 \frac{1,57^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,27 \text{ m} \quad (26)$$

Usando a Equação (7) e sendo $v_1 = v_2$:

$$\Delta P = 0,27 \text{ m} \cdot 1,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 1,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 7,95 \text{ m} = 89 \text{ Pa} \quad (27)$$

Para o 3º andar:

$$h_{ld} = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} + k_l \frac{v^2}{2g} = 0,024 \frac{4,30 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} \frac{1,57^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1 \cdot 1,5 \frac{1,57^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,23 \text{ m} \quad (28)$$

Usando a Equação (7) e sendo $v_1 = v_2$:

$$\Delta P = 0,24 \text{ m} \cdot 1,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 1,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4,3 \text{ m} = 49 \text{ Pa} \quad (29)$$

CÁLCULO DA PERDA DE CARGA E DA QUEDA DE PRESSÃO EM CADA DUTO ELEVADO (ENTRADA DA SALA)

Entre o duto enterrado e o 1º andar:

$$\text{Re} = \frac{\rho_m v D}{\mu} = \frac{1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,3 \text{ m}}{19 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}} = 108.474 \quad (30)$$

Do diagrama de Moody:

$$\text{Re} = 108.474 \text{ e } \varepsilon/D_h = 0,00015 \rightarrow f = 0,018$$

$$h_{ld} = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} + k_l \frac{v^2}{2g} = 0,018 \frac{2 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} \frac{6^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1 \cdot 1,5 \frac{2^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,53 \text{ m} \quad (31)$$

Usando a Equação (7) e sendo $v_1 = v_2$:

$$\Delta P = 0,53 \text{ m} \cdot 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ m} = 28 \text{ Pa} \quad (32)$$

Entre o 1º andar e o 2º andar:

$$\text{Re} = \frac{\rho_m v D}{\mu} = \frac{1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,3 \text{ m}}{19 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}} = 72.316 \quad (33)$$

Do diagrama de Moody: $\text{Re} = 72.316$ e $\varepsilon/D_h = 0,00015 \rightarrow f = 0,0195$

$$h_{ld} = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} + k_l \frac{v^2}{2g} = 0,0195 \frac{2 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} \frac{4^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1 \cdot 1,5 \frac{2^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,41 \text{ m} \quad (34)$$

Usando a Equação (7) e sendo $v_1 = v_2$:

$$\Delta P = 0,41 \text{ m} \cdot 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3,65 \text{ m} = 46 \text{ Pa} \quad (35)$$

Entre o 2º andar e o 3º andar:

$$\text{Re} = \frac{\rho_m v D}{\mu} = \frac{1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,3 \text{ m}}{19 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 36.158 \quad (36)$$

Do diagrama de Moody:

$$\text{Re} = 36.158 \text{ e } \varepsilon/D_h = 0,00015 \rightarrow f = 0,0225$$

$$h_{id} = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} + k_f \frac{v^2}{2g} = 0,0225 \frac{2 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} \frac{2^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 1 \cdot 1,5 \frac{2^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,34 \text{ m} \quad (37)$$

Usando a Equação (7) e sendo $v_1 = v_2$:

$$\Delta P = 0,34 \text{ m} \cdot 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 1,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3,65 \text{ m} = 45 \text{ Pa} \quad (38)$$

SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Considerando dados típicos do mês de dezembro para Cachoeira do Sul:

- 1) No duto enterrado de 50 m, a temperatura é reduzida em 5,6°C (de 30,3°C para 24,7°C) para velocidade de escoamento de 6 m/s;
- 2) A velocidade média de ar em cada sala será 0,01 m/s (vazão volumétrica de 0,424 m³/s), resultando em tempo de residência de aproximadamente 9,9 min e em 6,1 trocas de ar em cada hora;
- 3) A velocidade de ar nos dutos elevados de saída será de 1,57 m/s (dutos retangulares com diâmetro hidráulico de 0,3 m);
- 4) Cada chaminé irá aquecer o ar de saída para uma temperatura média de 44,6°C;
- 5) A superfície da chaminé poderá atingir temperatura máxima de 94°C (temperatura média de 58°C);

- 6) As densidades do ar nas temperaturas de 24,7, 30,3 e 44,6°C são, respectivamente, 1,16, 1,13 e 1,08 kg/m³;
- 7) As perdas de carga nos dutos elevados nas salas do 1º, 2º e 3º andares são, respectivamente, 0,31 m, 0,27 m e 0,23 m;
- 8) A perda de carga no duto enterrado é de 17,8 m;
- 9) As quedas de pressão entre a entrada e saída (chaminé) dos dutos elevados nas salas do 1º, 2º e 3º andares são, respectivamente, 128 Pa, 89 Pa e 49 Pa;
- 10) A queda de pressão entre a entrada e saída do duto enterrado é de 200 Pa;
- 11) As quedas de pressão nos dutos de entrada do ar nas salas são 28 Pa, 46 Pa e 45 Pa para os vãos entre o duto enterrado e o 1º andar, entre o 1º e 2º andares e entre o 2º e 3º andares, respectivamente.

Fundamentando-se nos cálculos de trocas térmicas, perda de carga e queda de pressão desenvolvidos neste documento, conclui-se que o sistema proposto poderá ser utilizado para o condicionamento de ar nas salas de aula para dias típicos de verão no mês de dezembro, reduzindo em aproximadamente 5,6°C a temperatura da sala.

Referências

- [1] Camargo, Mariela; Análise do desempenho de dutos enterrados para arrefecimento de uma habitação na zona bioclimática 2. Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, 2017, 112 p.
- [2] Tiba, Chigueru; Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos. Ed. Universitária da UFPE, Recife, 2000, 111 p.
- [3] Incropera, Frank P.; Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Ed. 7ª. John Wiley & Sons, New Jersey, 2011, 1076 p.
- [4] Munson, Bruce R.; Fundamentals of Fluid Mechanics. Ed. 7ª. John Wiley & Sons, New Jersey, 2013, 796 p.
- [5] Neves, Leticia O.; Chaminé solar como elemento indutor de ventilação natural em edificações. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 2012, 158 p.

Figura 39 - Diagrama de Moody

