

CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA

Avaliação do conforto térmico de uma edificação escolar no município de Macaíba/RN e proposição de Cartilha com estratégias passivas de condicionamento térmico.



LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

JOÃO VICTOR DA SILVA COSTA SOUZA

**CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA: AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO
DE UMA EDIFICAÇÃO ESCOLAR NO MUNICÍPIO DE MACAÍBA/RN E PROPOSIÇÃO DE
CARTILHA COM ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO.**

NATAL/RN

Novembro/2025

JOÃO VICTOR DA SILVA COSTA SOUZA

**CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA: AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO
DE UMA EDIFICAÇÃO ESCOLAR NO MUNICÍPIO DE MACAÍBA/RN E PROPOSIÇÃO DE
CARTILHA COM ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Universitário do Rio
Grande do Norte (UNI-RN) como requisito
final para obtenção do título de Graduação
em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof.(a.) Dr.(a.) Camila
Furukava.

NATAL/RN
Novembro/2025

Catalogação na Publicação – Biblioteca do UNI-RN

Setor de Processos Técnicos

Souza, João Victor da Silva Costa.

Conforto térmico em salas de aula: avaliação do conforto térmico de uma edificação escolar no município de Macaíba/RN e proposição de cartilha com estratégias passivas de condicionamento térmico / João Victor da Silva Costa Souza. – Natal, 2025.

145 f.

Orientadora: Profa. Dra. Camila Furukava.

Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Universitário do Rio Grande do Norte.

Material possui cartilha (Conforto térmico em edificações).

1. Conforto térmico – Monografia. 2. Edificações escolares – Monografia. 3. Clima quente e úmido – Monografia. 4. Estratégias passivas – Monografia. 5. Desempenho térmico – Monografia. I. Furukava, Camila. II. Título.

RN/UNI-RN/BC

CDU 72

JOÃO VICTOR DA SILVA COSTA SOUZA

**CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA: AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO
DE UMA EDIFICAÇÃO ESCOLAR NO MUNICÍPIO DE MACAÍBA/RN E PROPOSIÇÃO DE
CARTILHA COM ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Universitário do Rio
Grande do Norte (UNI-RN) como requisito
final para obtenção do título de Graduação
em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Camila Furukava

Orientador

Prof. M.a Marcela de Melo Germano da Silva Jankovic

Membro Interno

Prof. Dra. Bianca Carla Dantas de Araújo

Membro Externo

AGRADECIMENTOS

O percurso de uma graduação é sempre uma jornada coletiva, e a conclusão desta pesquisa reflete o apoio incondicional e a valiosa colaboração de uma grande rede. Por isso, expresso meu mais profundo e sincero **OBRIGADO** a todos que, de alguma forma, estiveram presentes antes e durante esta formação.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família. Minha mãe, Lucicleide Maria, e ao meu pai, João Bosco, que, mesmo diante de todas as dificuldades, me criaram com muito amor, carinho e alegria. Aos meus irmãos mais novos, Gabriel e Henrique, que tiveram paciência em me esperar nos momentos de ausência, cuidando um do outro e me apoiando do jeito deles. Às minhas avós e avôs, tios e tias, por sempre se importarem; aos meus primos mais velhos e a todos os demais que me auxiliaram a moldar quem sou hoje. Agradeço à minha querida amiga Wislianys Melo, que me acompanha desde os sete anos de idade, estando presente em todos os principais momentos da minha vida e que pretendo levar comigo para sempre.

Agradeço aos colegas e amigos da turma de Arquitetura, em especial Heloísa Farache, com quem tive interação no primeiro dia de aula presencial, quando estava morrendo de medo de não fazer amigos e de não conseguir me encaixar. Às amizades que, aos poucos, fui construindo – Lilian, Giovana, Melissa, Pedro, Maryanne, Rafael, Cássia, Giuliana, Diana e Yan –, que tiveram presença importante na elaboração deste trabalho, seja apoiando de forma técnica, seja enviando mensagens que chegavam nos momentos em que eu mais precisava.

Agradeço aos meus tutores de estágio e futuros colegas de profissão: Juliana Bulhões, responsável por me ensinar as bases do detalhamento arquitetônico, por me introduzir no mercado, apresentando o mais alto nível de sofisticação e o maior grau de atenção aos detalhes que a arquitetura pode proporcionar; Rani de Moraes, do Espaço Quatre, por me apresentar as diversas possibilidades e caminhos do mundo BIM; Chico Júnior, da Planeje, por ser, desde o início do curso, uma grande referência do profissional que pretendo me tornar e pelo apoio nesta etapa final; e ao meu grande amigo Stephen O'Brien, da SCMCE/SEEC, com quem pude trocar experiências

profissionais ao longo dos últimos dois anos, em uma dinâmica rica de compartilhamento de conhecimentos.

Agradeço a todos os professores do curso de Arquitetura do UNI-RN, em especial Sandra Albino e Huda Andrade, que sempre me apoiaram e estiveram presentes nos momentos cruciais da minha formação pessoal e profissional, oferecendo conselhos tanto acadêmicos quanto de vida. Agradeço também à Miss Lene, pelas conversas ricas e pelos direcionamentos que funcionaram como uma valiosa coorientação informal, enriquecendo profundamente este trabalho. À professora Débora Nogueira, por me incentivar a conhecer o mundo do conforto ambiental, área na qual iniciei pelos estudos acústicos e acabei me encontrando no conforto térmico.

À professora e convidada interna Marcela Germano e à equipe da Nortear, pelos direcionamentos diretos e indiretos que iluminaram e guiaram parte das decisões tomadas na pesquisa. Estendo meus agradecimentos ao Laboratório de Conforto Ambiental da UFRN (LABCON/UFRN), em especial à professora Juliana Portela, pela inestimável colaboração no empréstimo e uso dos equipamentos para a aferição dos dados objetivos da pesquisa.

Agradeço à melhor equipe de levantamento que eu poderia ter formado — Yan, Cássia e Giuliana —, que foi essencial para tornar este trabalho possível.

O maior de todos os agradecimentos vai para minha orientadora, Camila Furukava, pela orientação cuidadosa, pela liberdade concedida no processo de aprendizado e pela amizade construída ao longo do percurso. Seu olhar atento, o incentivo constante e o apoio às minhas decisões foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação pessoal e profissional.

Agradeço a quem teve um papel significativo nesta jornada, uma presença que, mesmo não estando presente na reta final, mesmo não tendo citação nominal, contribuiu por meio de conversas, apoio e gestos que fizeram e seguem fazendo diferença. Agradeço também a todas as pessoas incríveis que conheci nesses últimos anos — aos que passaram, aos que ficaram e aos que espero reencontrar.

“O futuro das cidades começa com edifícios preparados para o calor.”

Roberto Lamberts.

RESUMO

O conforto térmico em ambientes escolares constitui um requisito essencial para o conforto ambiental, o desempenho cognitivo e a qualidade do processo de ensino-aprendizagem, especialmente em regiões de clima quente e úmido. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de salas de aula da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho, no município de Macaíba/RN, a fim de identificar as condições reais de conforto dos usuários e, a partir desse diagnóstico. Propor estratégias passivas de requalificação aplicáveis a edificações escolares existentes, organizadas em uma cartilha formativa e expositiva sobre conforto e desempenho térmico em edificações escolares.

A metodologia adotada integra revisão bibliográfica, análise documental, medições ambientais – temperatura, do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar, velocidade do ar e temperaturas superficiais – e a aplicação de questionário de percepção térmica, seguindo o modelo adaptativo da ABNT NBR 16401-2:2024. Os resultados apontam a predominância de desconforto térmico, ventilação natural insuficiente, elevadas temperaturas internas e influência significativa da radiação solar sobre a envoltória da edificação. Ensaios com estratégias de sombreamento e isolamento térmico demonstram redução efetiva dos ganhos de calor.

Com base nesses achados, são organizadas estratégias passivas fundamentadas nos processos de regulação térmica – radiação, condução, convecção e evaporação –, abrangendo dispositivos de sombreamento, ampliação da ventilação cruzada, melhorias nos materiais construtivos e o uso de vegetação. O estudo culmina na elaboração de uma cartilha didática, que traduz conceitos técnicos em orientações práticas para gestores e profissionais, contribuindo para a promoção de ambientes escolares mais confortáveis, eficientes e adequados às condições climáticas locais.

Palavras-chave: Conforto térmico; edificações escolares; Clima quente e úmido; Estratégias passivas; Desempenho térmico.

ABSTRACT

Thermal comfort in school environments is an essential requirement for environmental comfort, cognitive performance, and the quality of the teaching-learning process, especially in hot and humid climate regions. In this context, this research aims to evaluate the thermal performance of classrooms at the Alfredo Mesquita Filho State School, located in the municipality of Macaíba, Rio Grande do Norte, Brazil, in order to identify the actual comfort conditions experienced by users and, based on this diagnosis, propose passive retrofit strategies applicable to existing school buildings. These strategies are organized into an educational and illustrative handbook focused on thermal comfort and performance in school buildings.

The adopted methodology integrates a literature review, document analysis, environmental measurements—air temperature, mean radiant temperature, relative humidity, air velocity, and surface temperatures—and the application of a thermal perception questionnaire, following the adaptive comfort model of ABNT NBR 16401-2:2024. The results indicate a predominance of thermal discomfort, insufficient natural ventilation, high indoor temperatures, and a significant influence of solar radiation on the building envelope. Tests involving shading and thermal insulation strategies demonstrate an effective reduction in heat gains.

Based on these findings, passive strategies grounded in thermal regulation processes—radiation, conduction, convection, and evaporation—are organized, encompassing shading devices, enhanced cross-ventilation, improvements in construction materials, and the use of vegetation. The study culminates in the development of a didactic handbook that translates technical concepts into practical guidelines for managers and professionals, contributing to the promotion of more comfortable, efficient, and climate-responsive school environments.

Keywords: Thermal comfort; school buildings; Hot and humid climate; Passive strategies; Thermal performance.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 - Fatores de Influência do Conforto Térmico.....	22
Figura 02 - Representação das variáveis de influência do conforto térmico.....	23
Figura 03 - Valores das Taxas de calor produzidas pelo metabolismo em diferentes atividades.....	24
Figura 04 - Níveis de Isolamento Térmico Produzido por diferentes tipos de vestimenta.	25
Figura 05 - Mecanismos instintivos e culturais de adaptação ao meio térmico em climas frios e quentes.....	27
Figura 06 - Formas de Troca de Calor entre o Corpo Humano e o Ambiente físico.....	28
Figura 07 - Diagrama Bioclimático adaptado por Koenigsberg (1977) para climas quentes.	32
Figura 08 - Carta Bioclimática de Givoni.	34
Figura 09 - Escala sétima de conforto térmico.....	35
Figura 10 - Faixa de Temperatura Operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados.	38
Figura 11 - Sequência de cálculos aplicados ao método adaptativo.....	39
Figura 12 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro.	44
Figura 13 - Condicionamento Ativo e Passivo.	47
Figura 14 – Relação da radiação incidente para o céu claro, parcialmente encoberto e encoberto.....	48
Figura 15 - Simulação transmitância térmica para diferentes composições de alvenaria....	51
Figura 16 - Imagem da fachada frontal e pátio interno do CEEP Amazonina.	59
Figura 17 - Localização CEEP Amazonina.	60
Figura 18 - Conjunto arquitetônico do CEEP Amazonina.....	61
Figura 19 - Localização das salas de medição.....	62
Figura 20 - Aberturas das salas de aula voltadas para o pátio interno e fachada externa da edificação.	63
Figura 21 - Beirais nas fachadas Norte e Sul do Bloco Central.....	64
Figura 22 - Temperatura Superficial da Fachada Externa Norte.	64
Figura 23 - Variação de temperatura mensurada na sala de aula A.	65
Figura 24 - Proteção solar das esquadrias na fachada oeste.	66
Figura 25 – Imagem da Fachada da Kindergarten School.	67
Figura 26 - Planta Baixa dos Pavimentos Térreo e Superior da Kindergarten School.....	68
Figura 27 - Imagens do Pátio interno da Kindergarten School.	69
Figura 28 - Imagem da fachada frontal da Escola Primária de Gando.	70

Figura 29 - Planta Baixa da Escola Primária de Gando.....	70
Figura 30 - Imagem da Fachada lateral da Escola Primária de Gando.....	71
Figura 31 - Imagens da Fachada frontal da Escola Primária de Gando.....	72
Figura 32 - Localização Universo de Estudo: Município de Macaíba/RN.....	75
Figura 33 - Recorte do Universo de Estudo - Bairro Alfredo Mesquita.....	76
Figura 34 - Localização da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.	76
Figura 35 - Mapa de gabarito no entorno da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.....	77
Figura 36 - Setorização dos Blocos da Escola Objeto de Estudo.....	78
Figura 37 - Fotos Internas da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho	79
Figura 38 - Fachada Frontal da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.	80
Figura 39 - Temperaturas máximas registradas por mês em Macaíba/RN.....	81
Figura 40 - Diagrama da direção predominante da ventilação em Macaíba/RN.	82
Figura 41 - Irradiação Direta Normal para o Estado do Rio Grande do Norte.	83
Figura 42 - Carta Solar (Diagrama Estereográfico) para o município de Macaíba/RN na data do solstício de inverno (21/12) às 8h30 / Trajetória solar sobre a edificação objeto de estudo.	84
Figura 43 - Localização das salas de aula objeto de análise.	85
Figura 44 - Trajetória solar para o dia 04 de setembro de 2025.	86
Figura 45 - Imagens da demolição da cobertura das circulações da escola.....	87
Figura 46 - Equipe de medição na Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho (Macaíba/RN), durante a coleta de dados ambientais no dia 04/09/2025.	90
Figura 47 – Planta baixa esquemática das salas de aula 01 e 02 com a indicação dos três pontos de medição.	91
Figura 48 - Esquema das alturas e pontos de medição das variáveis ambientais internas.	92
Figura 49 – Instrumentos de medição.	93
Figura 50 - Termo-Higro-Sonômetro-Luxímetro Digital.....	93
Figura 51 - Termo-Anemômetro Digital.....	94
Figura 52 - Termômetro de Globo.....	95
Figura 53 - Equipamento para medição de temperatura e umidade externa.	95
Figura 54 - Sensores para medição da temperatura superficial.	96
Figura 55 - Questionário Aplicado aos usuários na sala 01	98
Figura 56 - Ficha de Medição 01, utilizada pelo pesquisador na sala 01.	99
Figura 57 - Ficha de Medição 02, utilizada pelo pesquisador na sala 01.	100
Figura 58 - Alunos presentes nas salas de aula avaliadas.	101
Figura 59 - Análise por ponto de medição na sala 01.....	103

Figura 60 - Esquema de gradiente das temperaturas do ar mensuradas em cada ponto avaliado na Sala 01.....	103
Figura 61 - Análise por ponto de medição na sala 02.....	104
Figura 62 - Esquema de gradiente das temperaturas do ar mensuradas em cada ponto avaliado na Sala 02.....	104
Figura 63 - Valores de velocidade do ar coletadas por Sala, período e altura.	106
Figura 64 - Estrutura de Cálculos para obtenção da Temperatura Radiante Média.....	107
Figura 65 - Equação para obtenção do valor da temperatura média predominante do ar externo.....	108
Figura 66 - Equação para obtenção dos limites superior e inferior de aceitabilidade térmica.	109
Figura 67 - Procedimento para cálculo da temperatura operativa.....	110
Figura 68 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados (Sala 01).	111
Figura 69 - Pontos de medição da temperatura superficial externa.....	114
Figura 70 - Temperaturas superficiais mensuradas em cada ponto de medição (Face Externa e Interna).....	115
Figura 71 -Temperaturas superficiais mensuradas em cada ponto de medição (Face Interna).	117
Figura 72 - Registros realizados com a câmera termográfica.	119
Figura 73 - Sombreamento com beiral ampliado e brises horizontais.	123
Figura 74 - Sombreamento com brises verticais e proteções laterais.	124
Figura 75 - Sobreando com árvores de copa ampla.	125
Figura 76 - Sistema de coleta de água pluvial e aspersão para resfriamento da cobertura.	126
Figura 77 - Instalação de cobogós entre o forro e laje para troca de ar quente.	126
Figura 78 - Sistema de isolamento térmico pelo exterior.	127
Figura 79 - Esquema prático para decisão de cor das fachadas.	127
Figura 80 - Relação entre a distância e a eficiência da estratégia.....	129
Figura 81 - Abertura inferior para ventilação e peitoril ventilado.	130
Figura 82 - Estratégias de ventilação aplicáveis ao objeto de estudo.	131
Figura 83 - Estratégias relacionadas ao ganho térmico da envoltória.	132
Figura 84 - Estratégias de cobertura.....	133
Figura 85 - Estratégias de Sombreamento.....	134
Figura 86 - Personagem principal da cartilha (variações).	135
Figura 87 - Figura 11 - Processos reguladores.	136

SUMÁRIO

01 - INTRODUÇÃO	16
02 – REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 CONFORTO TÉRMICO	21
2.1.1 Trocas Térmicas.....	28
2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO.....	30
2.2.1 Carta Bioclimática de Olgay	31
2.2.2 Carta Bioclimática de Givoni	33
2.2.3 Modelo Estático de Conforto Térmico	34
2.2.4 Modelo Adaptativo de Conforto Térmico.....	36
2.2.5 Panorama das Pesquisas Nacionais.....	40
2.3 ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO	43
2.4 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES.....	45
2.3.1 Fatores climáticos	47
2.3.2 Propriedades Térmicas dos Materiais da Envoltória.....	49
2.5 ESTRATÉGIAS DE PROJETO PARA A ZONA BIOCLIMÁTICA 5A.....	51
2.5.1 Ventilação	52
2.5.2 Sombreamento	54
2.5.3 Capacidade térmica dos materiais	55
3 REFERENCIAL EMPÍRICO	57
03 – REFERENCIAL EMPÍRICO	58
3.1 ESTUDO DE CASO DIRETO	59
3.2 ESTUDOS DE CASO INDIRETO	67
3.2.1 Estudo de caso indireto 01: DPS Kindergarten School – Bangalore, Índia	67
3.2.2 Estudo de caso indireto 02: Escola Primária de Gando – Gando, Burkina Faso	69
3.3 SÍNTESE DOS ESTUDOS DE CASO.....	72
.....	74
04 – UNIVERSO E OBJETO DE ESTUDO	74
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO UNIVERSO E OBJETO DE ESTUDO	75

4.1.1 Características físicas do objeto	78
4.1.2 Caracterização climática do universo de estudo e influência no objeto ..	81
4.2 DEFINIÇÃO DAS SALAS DE AULA PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	85
05 – AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	88
5.1 METODOLOGIA.....	89
5.1.1 Estratégia temporal de coleta de dados.	90
5.1.2 Medição das variáveis ambientais	91
5.1.3 Coleta de dados subjetivos	96
5.1.4 Limitações e imprecisões da pesquisa.....	101
5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO..	102
5.2.1 Temperatura do ar interno	102
5.2.2 Velocidade do ar interno	105
5.2.3 Temperatura radiante média.....	106
5.2.4 Aplicação do modelo adaptativo de conforto térmico.....	108
5.2.5 Resultado dos questionários.....	111
5.3 AFERIÇÃO DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS.....	113
5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA AVALIAÇÃO	117
	121
06 – DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS E ELEBORAÇÃO DA CARTILHA	121
6.1 - ESQUEMA DE ESTRATÉGIAS PARA REQUALIFICAÇÃO TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES EXISTENTES	122
6.1.1 - Controle de Radiação Solar (Eixo I)	123
6.1.2 – Controle do ganho térmico em superfícies (Eixo II)	125
6.1.3 – Uso otimizado de elementos vazados (Eixo III)	128
6.2 – APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS NO OBJETO DE ESTUDO.....	130
6.3 – PROCESSO DE ELABORAÇÃO DA CARTILHA.....	134
07 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
REFERÊNCIAS.....	141

01

INTRODUÇÃO

A educação, pilar fundamental para uma sociedade democrática, busca constantemente otimizar o desempenho nos processos de ensino-aprendizagem. Esse cenário é multifacetado, influenciado por tendências pedagógicas, dinâmicas sociais e políticas e, crucialmente, pela qualidade das condições físicas das edificações escolares (Kowaltowski, 2011).

Nesse panorama complexo, a arquitetura escolar desempenha um papel determinante. Seu planejamento espacial e organizacional, aliado a aspectos como ergonomia, acessibilidade e, de forma preponderante, o conforto ambiental – nas dimensões acústica, lumínica, térmica e funcional – assume relevância direta na experiência dos usuários. Essa influência repercute no processo de aprendizagem, uma vez que, como afirma Kowaltowski (2011, p. 139). “uma das funções dos espaços construídos é atender ao bem-estar do ser humano, para que este possa desenvolver suas atividades com conforto em todos os espaços sensoriais”. No presente trabalho, essa noção é compreendida pela ótica do conforto ambiental.

É nesse contexto que o conforto térmico se destaca como componente central. Entre os fatores que determinam a qualidade dos ambientes escolares, ele se evidencia como elemento crucial, pois o baixo desempenho térmico pode afetar não apenas a sensação térmica, mas também a percepção das demais variáveis ambientais (Araújo, 1996 apud Kowaltowski, 2011). A ABNT NBR 16401-2:2024 de parâmetros de conforto térmico para sistemas de condicionamento de ar confirma essa complexidade ao definir o conforto térmico como “o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico”, percepção resultante da interação entre variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade relativa e velocidade do ar) e variáveis humanas (taxa metabólica e isolamento da vestimenta). Assim, o desempenho térmico de uma edificação refere-se à sua capacidade de interagir com o clima externo para moldar condições internas adequadas ao conforto ambiental (Mendes et al., 2013), contribuindo significativamente para a eficiência e a redução do consumo energético (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

A bioclimatologia, ao investigar as relações entre clima e ser humano, orienta a adoção de estratégias arquitetônicas adequadas às condições ambientais de cada localidade (Bogo et al., 1994). A ABNT NBR 15220-2:2024 organiza o território brasileiro em 12 zonas bioclimáticas, cada uma com diretrizes específicas. Compreender o zoneamento é fundamental para a concepção de edificações que promovam conforto térmico de forma passiva, reduzindo a carga térmica sem recorrer a sistemas intensivos de climatização artificial.

A importância desse tema se intensifica em ambientes de aprendizagem. Em climas quentes e úmidos, como o do município de Macaíba/RN, a elevada umidade relativa dificulta a evaporação do suor, intensificando a sensação de desconforto ao calor (Kowaltowski, 2011). Estudos como os de Batiz et al. (2001), Park, Behrer e Goodman (2021) e Fernandes (2023) mostram que o aumento das temperaturas em salas de aula está associado a redução da capacidade cognitiva e ao comprometimento do desempenho escolar. Dessa forma, o conforto térmico configura-se como elemento indispensável para um ambiente educacional eficaz.

Esse desafio se torna ainda mais relevante diante das mudanças climáticas globais. Segundo o Relatório de Síntese (AR6) do Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC, 2023), práticas insustentáveis de uso de energia elevaram a temperatura média global em 1,1 °C entre 2011 e 2020. A crescente dependência de sistemas de condicionamento artificial para lidar com temperaturas elevadas intensifica o consumo energético e as emissões de carbono, contribuindo para um ciclo vicioso que agrava crises ambientais e desigualdades socioeconômicas.

A problemática do conforto térmico em ambientes de ensino-aprendizagem se alinha, assim, a dois Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU:

ODS 4 – Educação de Qualidade: a garantia de ambientes adequados é condição essencial para uma educação inclusiva e eficaz.

ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima: estratégias bioclimáticas reduzem a dependência de ar-condicionado, colaborando com práticas sustentáveis.

Considerando essas questões, esta pesquisa busca aprofundar a discussão sobre o conforto térmico em escolas situadas em clima quente e úmido, com foco no município de Macaíba/RN. O objetivo não é apenas identificar problemas, mas também propor soluções que possam ser aplicadas em contextos semelhantes.

O objetivo central deste trabalho é avaliar o desempenho térmico de salas de aula da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho, em Macaíba/RN, para identificar as condições reais de conforto dos usuários e, a partir desse diagnóstico, propor estratégias passivas de requalificação aplicáveis a edificações escolares existentes, organizadas em uma cartilha formativa e expositiva sobre conforto e desempenho

térmico em edificações escolares. A cartilha constitui, portanto, um produto decorrente da avaliação diagnóstica, reunindo orientações técnicas e soluções aplicáveis à realidade logística, construtiva e climática do universo de estudo.

Para concretizar esse objetivo, a pesquisa estrutura-se em etapas sequenciais que envolvem a compreensão teórica das variáveis que influenciam o desempenho e o conforto térmico, a caracterização das condições climáticas locais e a avaliação das condições internas das salas de aula analisadas. A partir desse diagnóstico, são propostas estratégias passivas compatíveis com as necessidades identificadas.

Essa investigação adota uma abordagem metodológica mista, articulando análise bibliográfica e documental, coleta de dados ambientais e aplicação de questionário de percepção térmica. Inicialmente, a pesquisa bibliográfica e documental permitiu compreender os fundamentos do desempenho térmico e do conforto ambiental, além de caracterizar o contexto climático do município.

Na etapa empírica, realizou-se a coleta de dados ambientais (temperatura do ar, umidade relativa, temperatura média radiante e velocidade do ar), seguindo o modelo adaptativo de conforto presente na ABNT NBR 16401-2:2024. Simultaneamente, foi aplicado um questionário semiestruturado de percepção térmica, sensação e preferência, adaptado ao público escolar. Essa etapa teve o propósito de integrar dados objetivos e subjetivos, contribuindo para a compreensão sobre o desempenho térmico das salas de aula analisadas.

Por fim, os resultados foram sistematizados e utilizados como base para a elaboração da cartilha com estratégias arquitetônicas passivas, visando orientar intervenções em escolas localizadas em clima quente e úmido.

02

REFERENCIAL TEÓRICO

A sessão de referencial teórico aprofunda a discussão sobre conforto térmico e desempenho térmico de edificações, temas cruciais para a qualidade do ambiente de ensino-aprendizagem. Será explorada a complexidade do conforto térmico, abordando os fatores físicos, fisiológicos e psicológicos que influenciam a percepção humana, e apresenta os principais métodos de avaliação, como o modelo adaptativo. Além disso, discute o zoneamento bioclimático brasileiro e as estratégias de projeto passivas, com foco na Zona Bioclimática 5A, buscando fundamentar o conteúdo da cartilha com estratégias de projeto para otimizar o conforto térmico em escolas de clima quente e úmido.

2.1 CONFORTO TÉRMICO

O conforto térmico, um pilar fundamental para o bem-estar humano, é uma exigência essencial na arquitetura. Sua relevância reside na integração de diversos aspectos que promovem a qualidade de vida nos ambientes projetados (Medeiros, 2019).

Em consonância com essa perspectiva, a Norma Brasileira ABNT NBR 16401-2:2024, que estabelece parâmetros de conforto térmico, define-o como “o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico e a temperatura do corpo como um todo”.

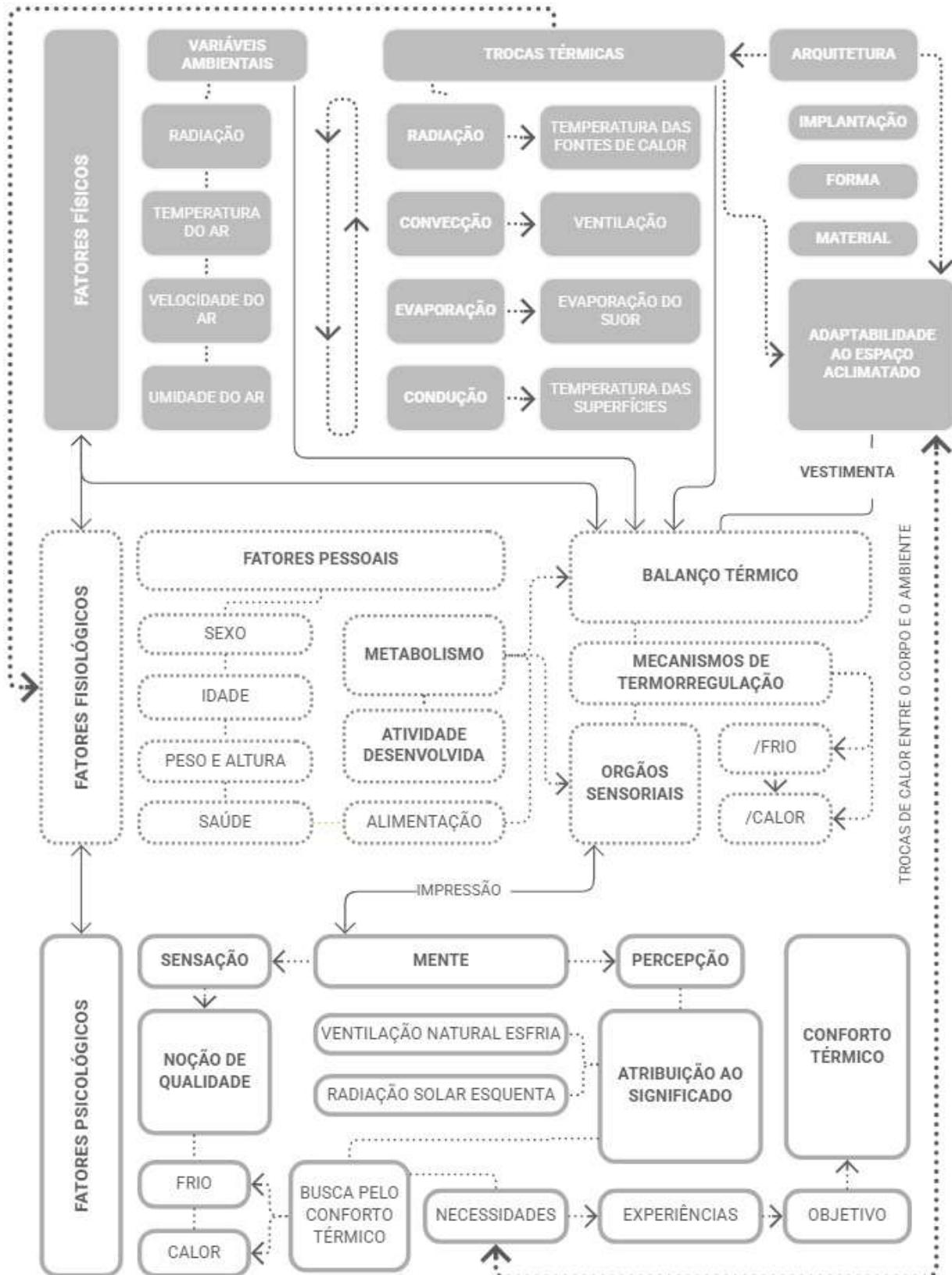
Lamberts et al. (2016) enfatizam a natureza subjetiva do conforto térmico. Para os autores, essa sensação complexa resulta da integração de três grupos de fatores interconectados: físicos, fisiológicos e psicológicos.

Os fatores físicos englobam as respostas do organismo às condições proporcionadas pelas variáveis ambientais, como a radiação incidente, temperatura, velocidade do ar e a umidade. A arquitetura da edificação também desempenha um papel crucial na interação com essas variáveis, através da orientação de sua implantação, aspectos formais e materiais empregados.

Os fatores fisiológicos referem-se, por sua vez, às respostas intrínsecas do corpo às condições térmicas, mediadas pelos mecanismos de termorregulação. Fatores individuais e pessoais, como a atividade e a alimentação do usuário, influenciam os processos de termorregulação, elementos centrais para experiência do conforto térmico.

Os fatores psicológicos dizem respeito às perspectivas e expectativas individuais em relação à sensação térmica, que moldam uma “impressão” no indivíduo. Entre as variáveis psicológicas destacam-se a sensação de frio ou calor, a percepção da qualidade do ambiente, a percepção do espaço e a atribuição de significado (Figura 01).

Figura 01 - Fatores de Influência do Conforto Térmico.



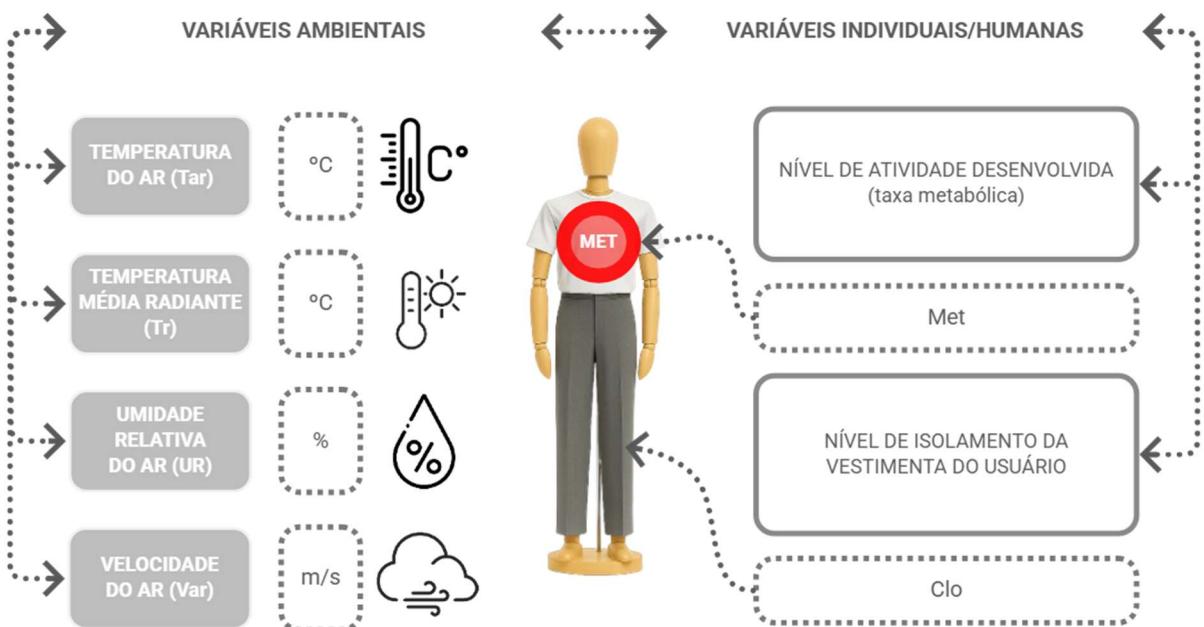
Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Batiz et al. (2019).

Observa-se ainda, a partir das percepções coletadas, que elementos subjetivos ligados ao estado emocional dos usuários também modulam sua leitura do ambiente térmico. Embora não alterem diretamente as variáveis físicas.

Conforme Batiz et al. (2019), entre os fatores psicológicos também se incluem a tolerância às percepções (ou seja, a capacidade de suportar desconforto térmico por um período), os ajustes e adaptações térmicas do entorno, e a busca pelo conforto térmico, que é guiada por necessidades analisadas a partir de experiências prévias, possibilitando a tomada de decisões que ajustam o conforto com o objetivo de alcançar o bem-estar.

A percepção do conforto térmico pelo corpo humano envolve intrinsecamente os processos de regulação, perda e ganho de calor, influenciados pelos fatores psicológicos e pelo comportamento em resposta às variáveis externas. A NBR 16401-2:2024, baseada em normativas internacionais, estabelece duas categorias principais de variáveis que influenciam as condições de conforto térmico: as ambientais (temperatura do ar – T_{ar} em °C, temperatura média radiante – T_r em °C, velocidade do ar – V_{ar} em m/s e umidade relativa do ar – UR em %) e as humanas (atividade desenvolvida, expressa em Met – taxa metabólica, e isolamento da vestimenta do usuário, expresso em Clo) (Figura 02).

Figura 02 - Representação das variáveis de influência do conforto térmico.



Fonte: Autor, 2025.

A taxa metabólica refere-se à quantidade de energia que o corpo humano consome para manter suas funções e realizar atividades, desde os procedimentos internos essenciais como a respiração e os batimentos cardíacos, até o movimento e o pensamento (Wahrlich, Anjos, 2001).

A taxa metabólica de um indivíduo aumenta conforme a intensidade da atividade desenvolvida. Essa relação é ilustrada na Figura 03, que apresenta como diferentes atividades resultam em diferentes valores metabólicos.

Figura 03 - Valores das Taxas de calor produzidas pelo metabolismo em diferentes atividades.



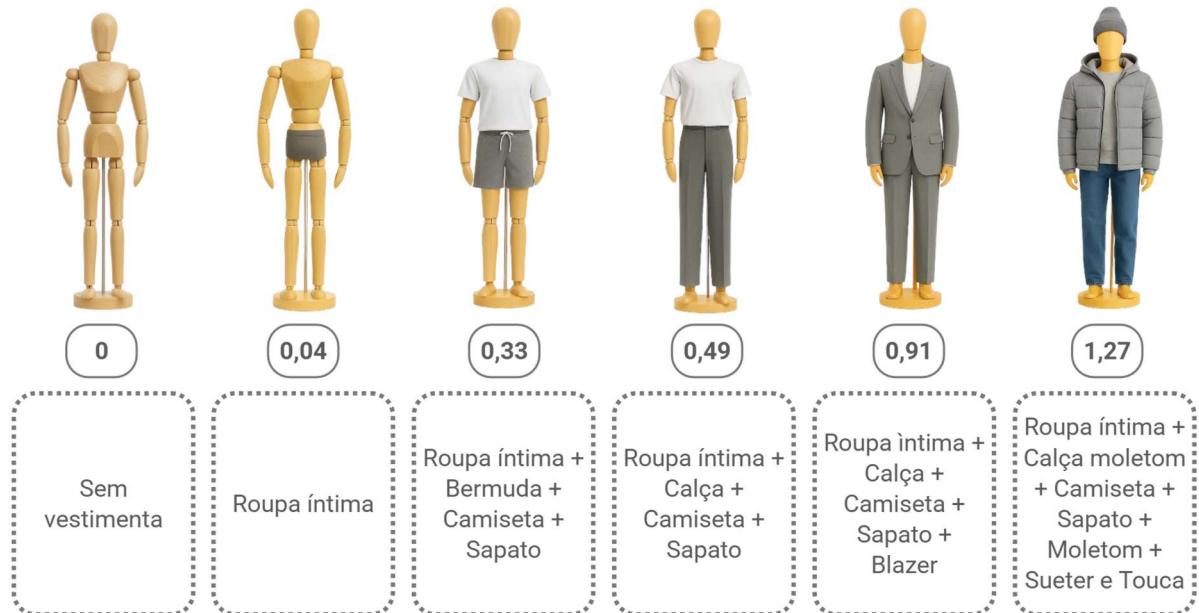
Fonte: Autor, 2025.

Além disso, características individuais como sexo, peso, altura e idade também influenciam esses valores. A NBR 16401-2:2024 fornece valores de taxa metabólica específicos para diversas atividades, valores mensurados a partir de condições de sensação térmica neutra onde o indivíduo avaliado não apresenta desconforto por frio ou calor.

A resistência térmica da roupa é um fator de grande importância na sensação de conforto térmico do indivíduo. Conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2014), essa variável, medida em Clo, representa a capacidade de isolamento da vestimenta, onde

1,0 Clo equivale a uma resistência térmica de $0,1555\text{m}^2\text{ C/W}$, o que corresponde aproximadamente à resistência térmica de um terno completo (Figura 04).

Figura 04 - Níveis de Isolamento Térmico Produzido por diferentes tipos de vestimenta.



Fonte: Autor, 2025.

Esse fator é essencial, pois a roupa atua como uma barreira que modula as trocas de calor do corpo humano com o ambiente por condução, convecção e radiação. Por sua vez, a roupa troca calor com o ar por convecção e com outras superfícies por radiação e condução. Quanto maior a resistência térmica da roupa, menores serão as trocas de calor com o meio.

PARA O OBJETO DESTE ESTUDO



- Para este estudo, considerando as atividades tipicamente realizadas em salas de aula, o nível de atividade metabólica adotado para os **alunos** em atividade geral será o de **atividade de escritório (lendo, sentado; escrevendo; digitando)**, equivalente a **1,0 Met** e “Em pé, relaxado” de **1,2 Met**.
- Com relação ao valor de **Clo**, será adotado o nível de isolamento de vestimenta de **0,49**, considerando o fardamento escolar padrão composto por Camiseta de manga curta, calça, sapato e meias + roupas íntimas conforme indicado na Tabela B.2 do Anexo B da **ABNT NBR 16401-2:2024**.

V. Araújo, (1996) define o conforto térmico como uma interação intrinsecamente ligada à dinâmica de trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente físico. Essa interação é crucial para otimizar o desempenho em qualquer atividade, evitando condições ambientais que gerem sensações térmicas desagradáveis. A consideração do conforto térmico como um processo dependente do balanço térmico entre o corpo e o ambiente justifica-se pela influência mútua entre os fatores físicos do ambiente e os aspectos psicofisiológicos dos usuários.

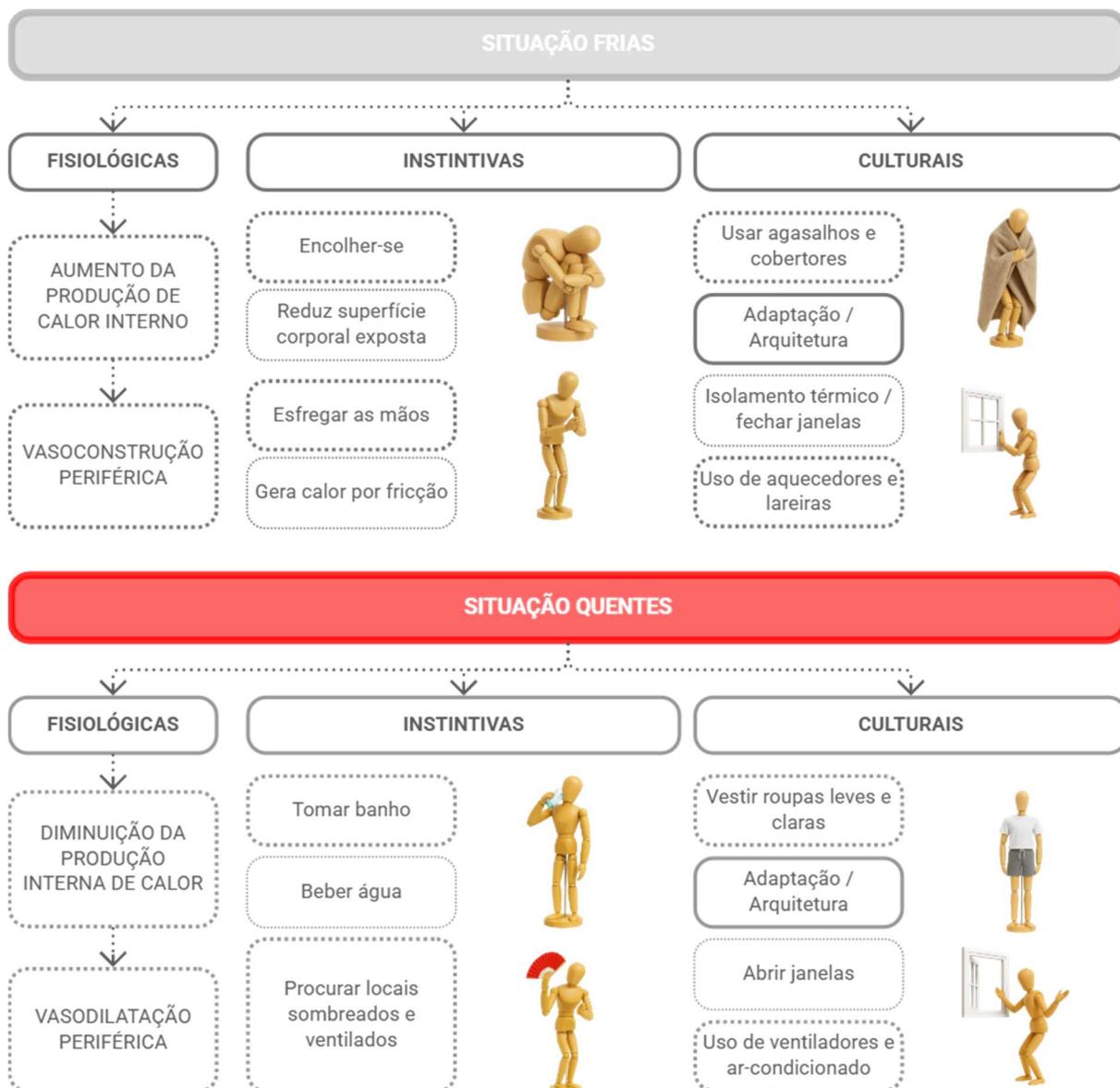
Segundo Frota e Schiffer (2001), o balanço térmico é a base para a manutenção da temperatura interna constante, que varia entre 31,1°C e 37,2°C, com limites de 32°C e 42°C. Quando as variáveis ambientais promovem perdas ou ganhos significativos de calor, o organismo aciona mecanismos fisiológicos de termorregulação.

Ainda conforme os autores, o corpo humano preserva sua homeostase térmica por meio de respostas distintas em situações de frio e de calor. Em ambientes frios, o organismo busca conservar calor e aumentar a produção interna por meio de mecanismos como vasoconstricção, arrepio e tremores. A vasoconstricção, nesse contexto, corresponde à contração dos vasos sanguíneos, reduzindo o fluxo de sangue próximo à superfície da pele e, portanto, limitando a perda de calor para o ambiente. Em ambientes quentes, a resposta fisiológica ocorre em sentido oposto: o organismo procura dissipar calor ao reduzir a produção interna e facilitar sua

transferência para o meio externo. A vasodilatação, caracterizada pela dilatação dos vasos sanguíneos e pelo aumento do fluxo de sangue na superfície da pele, favorece essa troca térmica. A sudorese, responsável pela evaporação do suor, constitui-se no principal mecanismo de resfriamento corporal descrito pelos autores.

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) apresentam estratégias instintivas e culturais praticadas pelo ser humano para se adaptar ao meio térmico, como usar agasalhos e se curvar em situações frias, e tomar banho ou se ventilar em situações quentes (Figura 05).

Figura 05 - Mecanismos intuitivos e culturais de adaptação ao meio térmico em climas frios e quentes.



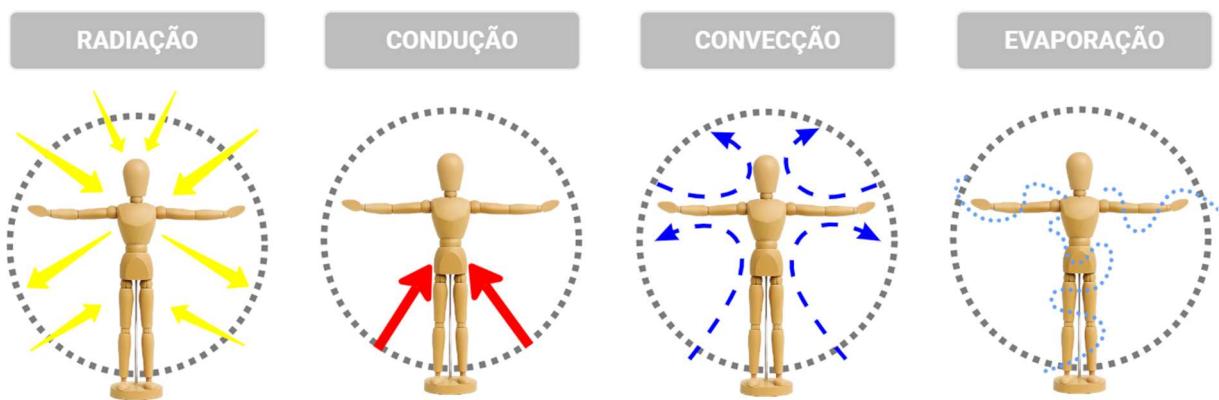
Fonte: Autor, 2025.

Segundo Fanger (1970, *apud* Araújo M., 2008), a satisfação térmica, ou a naturalidade térmica, é alcançada quando o indivíduo não experimenta qualquer sensação de desconforto, seja por frio ou por calor. A sensação de conforto térmico manifesta-se quando a troca de calor entre o corpo humano e o ambiente circundante ocorre em equilíbrio com o calor metabólico produzido durante a atividade desenvolvida, sem que os mecanismos de termorregulação sejam acionados (Frota e Schiffer, 2001). Nesse sentido, as condições de conforto térmico abrangem tanto os fatores ambientais e físicos quanto a atividade desenvolvida pelo indivíduo, a qual influencia diretamente a produção e a dissipação de calor pelo organismo

2.1.1 Trocas Térmicas

O balanço térmico entre o corpo humano e o ambiente é um processo dinâmico e fundamental para a sensação de conforto térmico. Essa interação é determinada por diversas variáveis climáticas e manifesta-se por meio de trocas de calor que podem ser classificadas em secas e úmidas (Araújo, M. 2008). As trocas secas envolvem a variação de temperatura e a perda de calor sensível (condução, convecção e radiação), enquanto as trocas úmidas ocorrem por mudança de fase como a evaporação do suor, resultando na perda de calor latente (evaporação) (Figura 06).

Figura 06 - Formas de Troca de Calor entre o Corpo Humano e o Ambiente físico.



Fonte: Autor, 2025.

A radiação, segundo Pagnossin, Buriol e Graciolli (2016), refere-se à troca de calor que ocorre entre o corpo e o ambiente por meio da emissão e da absorção de radiação térmica pela pele, que age como um radiador e absorvedor. M. Araújo (2008), complementa que a radiação depende da temperatura da superfície do corpo e das superfícies opostas, considerando que seu efeito pode ser usado para equilibrar a temperatura do ar.

A condução ocorre quando o corpo entra em contato direto com objetos de temperaturas diferentes, transferindo calor através das superfícies (Pagnossin; Buriol; Graciolli, 2016). M. Araújo (2008) ressalta que a condução depende da diferença de temperatura entre o corpo e o objeto em contato.

A convecção é a transmissão de calor do corpo para o ar que está em contato com a pele ou a vestimenta. Pagnossin, Buriol e Graciolli (2016) detalham que esse processo envolve o movimento do ar próximo à pele, onde o ar aquecido é substituído por ar mais frio, removendo o calor do corpo. A proporção da perda de calor aumenta à medida que o movimento do ar se torna mais rápido.

A evaporação configura-se como o principal mecanismo termorregulador do corpo humano para condições de calor, onde a evaporação do suor pelas vias respiratórias e nas superfícies da pele dissipa o calor do corpo para o ambiente térmico, auxiliando na manutenção da temperatura interna (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). M. Araújo (2008) classifica a evaporação como dependente da umidade do ar, ocorrendo de forma mais rápida em ambientes cuja umidade é mais baixa. A evaporação é responsável por aproximadamente 20% do calor corporal perdido para o ambiente, sendo um processo unidirecional, sempre do indivíduo para o meio, através da respiração, transpiração e perspiração. Em climas quentes e úmidos, a alta umidade relativa do ar dificulta significativamente o processo de evaporação do suor, intensificando a sensação de desconforto térmico (Kowaltowski et al., 2011).

Em síntese, o conforto térmico revela-se um elemento crucial que influencia diretamente o bem-estar e o desempenho humano, com particular relevância para o ambiente de ensino-aprendizagem. A complexidade dessa sensação envolve uma

intrínseca interação entre os fatores físicos, fisiológicos e psicológicos (Figura 01), cuja compreensão é fundamental para otimizar os espaços construídos. Reconhecer essa pluralidade permite entender que a avaliação do conforto térmico vai além da mensuração de variáveis ambientais, e deve incluir na análise os fatores subjetivos da percepção e adaptação humana.

Com essa base teórica, passa-se a discutir os modelos e metodologias empregados para avaliação do conforto térmico, fornecendo ferramentas necessárias para a análise e o planejamento de ambientes que buscam a otimização térmica.

2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Lamberts et al. (2016) ressalta a importância dos estudos de conforto térmico com base em três fatores principais: a satisfação e o bem-estar dos ocupantes, a relação entre o conforto, desempenho e produtividade humana e a economia de energia em edifícios por meio da eficiência energética proporcionada por estratégias passivas. O estudo do conforto térmico utiliza um conjunto de métodos para investigar e definir os requisitos essenciais na avaliação e no planejamento de ambientes termicamente adequados às atividades e à presença humana (Lamberts, 2026; Medeiros, 2019). Essa análise engloba tanto variáveis objetivas – como os aspectos físicos do ambiente, as características climáticas e os fatores individuais dos usuários – quanto variáveis subjetivas, que consideram as percepções e sensações térmicas dos ocupantes, incluindo seus aspectos psicológicos. Em interação e influência mútua, essas variáveis resultam nas condições térmicas percebidas, determinando o conforto ou desconforto térmico (Araújo, V. 1996; Lamberts, Dutra, Pereira, 2014).

O interesse em identificar a influência térmica nos usuários data do século XIX, e desde então, estudos e experimentos foram progressivamente desenvolvidos. Os resultados dessas pesquisas culminam na definição de dados qualitativos que estabelecem índices de conforto térmico e no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de prever as condições aceitáveis de conforto (Lazzarotto, 2007). Segundo M. Araújo (2008), os estudos relacionados aos parâmetros de

conforto térmico representam uma forma de facilitar a aplicação de conceitos de design bioclimático em projetos arquitetônicos.

De acordo com V. Araújo (1996), diversas metodologias são utilizadas na avaliação do conforto térmico. Os índices e as zonas de conforto resultam de pesquisas conduzidas em um espaço específico, sob condições climáticas particulares, envolvendo um público determinado, em uma atividade específica e com um certo tipo de vestimenta. Dessa forma, esses índices servem como referência para estudos aplicados em situações distintas às de origem, considerando as incertezas inerentes a essas novas condições.

Frota e Schiffer (2001) afirmam que existem muitos índices, zonas e modelos preditivos de conforto térmico. Contudo, a determinação de um índice deve considerar sua aplicação, levando em consideração o público-alvo e as condições ambientais da área em que a pesquisa será realizada.

No presente estudo, destacam-se dois tipos de modelos para avaliação do conforto térmico: Modelos Práticos, como a Carta Bioclimático de Givoni e o Diagrama Bioclimático de Olgay, avaliam as condições de conforto térmico e indicam estratégias de projeto bioclimático aplicáveis à edificação avaliada. Esses índices oferecem diretrizes de projeto que podem otimizar o conforto térmico de forma passiva, a depender da situação climática e das características de projeto; e os Modelos Teóricos, que englobam os modelos Estático e Adaptativo, focando na predição de sensação térmica com base em princípios fisiológicos e psicométricos. Eles visam avaliar as condições de conforto por meio da análise de diversas variáveis ambientais e individuais.

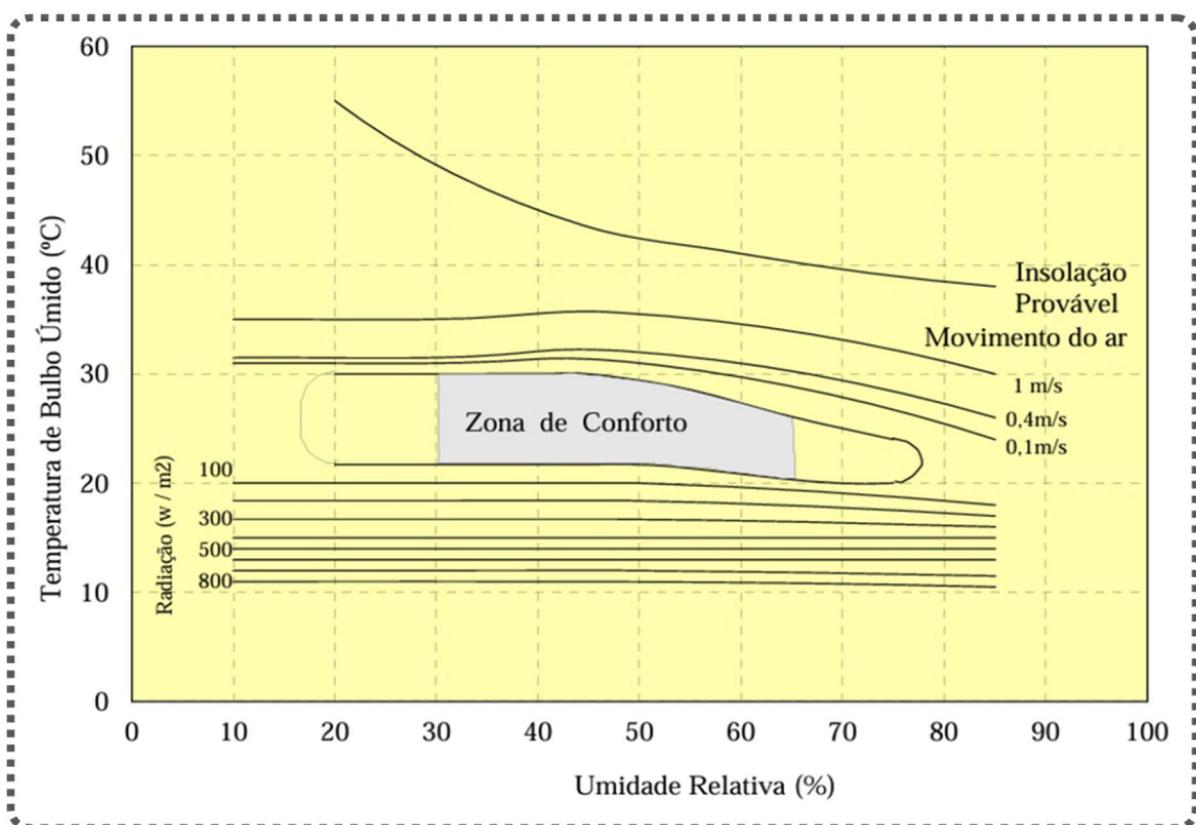
2.2.1 Carta Bioclimática de Olgay

Fundamentados em estudos sobre os efeitos do clima no conforto humano, os irmãos Olgay desenvolveram, em 1963, um diagrama bioclimático que se tornou um dos pilares do projeto Bioclimático (Lamberts; Dutra; Pereira., 2014). Essa ferramenta visa avaliar as condições de conforto térmico no ambiente externo, utilizando como parâmetro a temperatura de bulbo seco (Tbs em °C), apresentada no

eixo vertical do diagrama, e a umidade relativa do ar (UR em %), disposta no eixo horizontal.

O diagrama define uma zona de conforto com limites entre 20% e 65% de umidade relativa e 20°C e 30°C de temperatura de bulbo seco (Araújo, M., 2008). A carta bioclimática proposta por Olgay foi adaptada por Koenigsberg et al. (1977 *apud* Bogo et al., 1994), onde a zona de conforto delimitada pelo diagrama apresenta valores entre 21°C e 30°C de temperatura de bulbo seco e umidade entre 16% e 78% (Figura 07).

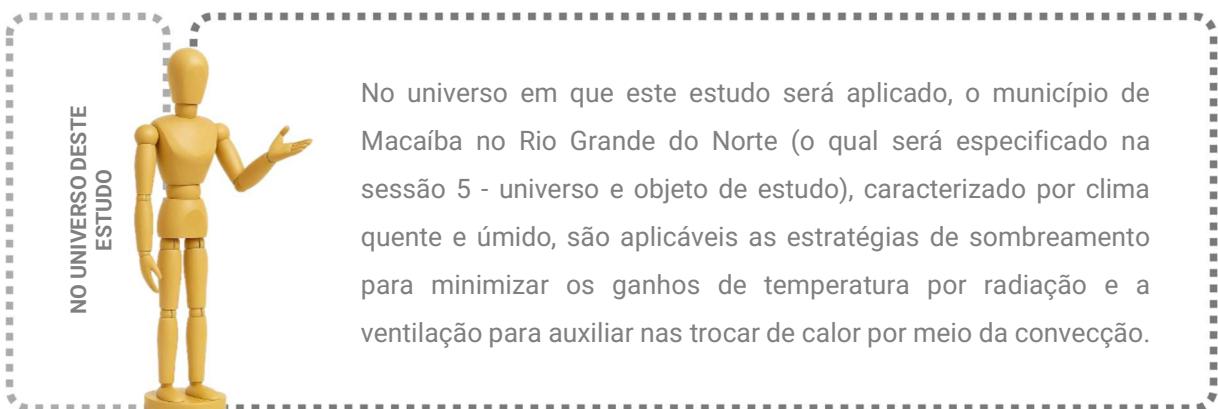
Figura 07 - Diagrama Bioclimático adaptado por Koenigsberg (1977) para climas quentes.



Fonte: V. Araújo (1996).

A aplicação prática da Carta Bioclimática de Olgay permite avaliar se as condições ambientais se encontram dentro da zona de conforto. Caso o ponto mensurado se situe fora dessa zona, propõem-se recomendações de estratégias de projeto para alcançar o conforto térmico, como o aproveitamento da radiação solar

para valores abaixo da zona de conforto ou o uso de ventilação e sombreamento para valores acima. Adicionalmente, em cenários de temperatura elevada e baixa umidade relativa, a umidificação do ar pode ser uma estratégia apropriada (Frota, Schiffer, 2001; Bogo et al., 1994).



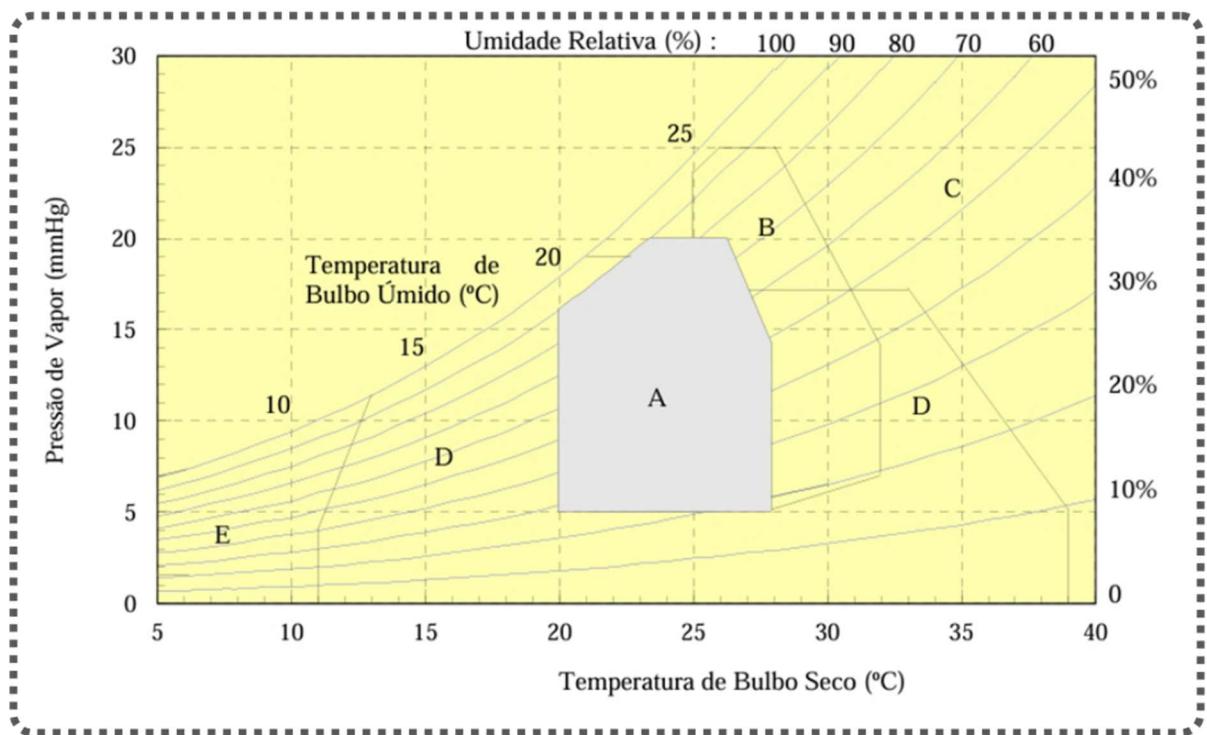
2.2.2 Carta Bioclimática de Givoni

Inspirado por estudos fisiológicos sobre o conforto térmico, Givoni propôs, em 1969, uma metodologia que complementava a abordagem de Olgay (Givoni, 1992 *apud* Bogo et al., 1994). Essa metodologia utilizava as médias dos valores de temperatura e umidade relativa do ar para representar o clima local mês a mês. Diferente de Olgay, Givoni baseou seus limites de conforto em temperaturas internas aos edifícios, obtidas por meio de cálculos que projetavam as temperaturas esperadas para o interior de uma edificação sem climatização artificial. A Carta Bioclimática de Givoni configura-se como um instrumento para definir os princípios básicos de projeto que visam garantir condições internas confortáveis, mesmo quando o clima exterior se encontra fora da zona de conforto ideal (Figura 08).

A contribuição fundamental de Givoni reside em sua abordagem que relaciona as condições climáticas externas com o desempenho térmico das edificações, considerando a influência de elementos como a massa térmica, a ventilação, o resfriamento evaporativo direto e indireto, o calor radiante e a umidificação. Givoni (1992 *apud* Bogo, 1994) também observou que habitantes de países quentes e em

desenvolvimento toleravam limites máximos de temperaturas e umidade mais elevados, sugerindo a expansão desses limites para tais locais demarcando diferentes zonas de conforto.

Figura 08 - Carta Bioclimática de Givoni.



Fonte: V. Araújo (1996).

Em síntese, Bogo et al. (1994) considera a Carta Bioclimática de Givoni como a que apresenta melhores condições de aplicação para o Brasil. Isso se deve ao fato de seu trabalho ter sido voltado para países quentes e em desenvolvimento, com base em pessoas aclimatadas a climas quentes e úmidos, além de adotar limites maiores de velocidade do ar para temperaturas mais elevadas, o que é coerente com a realidade brasileira.

2.2.3 Modelo Estático de Conforto Térmico

Fanger (1971), a partir de estudos aplicados em câmaras climatizadas artificialmente, propôs um método estático para avaliar o conforto térmico, o qual

estabelece uma correlação entre as variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar) e as variáveis individuais (taxa metabólica e nível de isolamento da vestimenta) com os níveis de sensação e preferência térmica dos usuários (Negreiros, 2013). Segundo V. Araújo (1996), Fanger identificou três requisitos fundamentais para o conforto térmico:

O primeiro requisito é que o corpo humano vive em constante balanço térmico com o ambiente, onde a perda de calor para o ambiente é igual à taxa de calor produzido pelo corpo. [...] O segundo requisito é que a temperatura média da pele pode ser um indicativo de conforto [...] O terceiro requisito é que existe uma taxa preferencial de sudação para o conforto, que é também função da taxa metabólica. (Araújo, V., p. 18, 1996).

O modelo estático de avaliação do conforto térmico utiliza os índices PMV (Voto Médio Estimado) e PDD (Percentagem de Pessoas Insatisfeitas). Esses índices empregam a escala de sete pontos de Bedford (Figura 09) para determinar, de maneira simétrica, as percepções dos usuários em relação ao conforto térmico.

Figura 09 - Escala sétima de conforto térmico.



Fonte: Autor, 2025.

A aplicação desses índices na determinação dos parâmetros de conforto térmico é amplamente adotada por pesquisadores da área (De Vecchi, 2015). Contudo, considerando o contexto em que os estudos iniciais foram conduzidos, algumas pesquisas questionam a aplicação da avaliação estática, especialmente em face das condições climáticas do Brasil (Araújo, V., 1996). A argumentação central é que seus resultados seriam mais adequados a espaços condicionados artificialmente, que não apresentam muitas variações ambientais relacionadas, conforme indicado na ABNT NBR 16401-2:2024.

2.2.4 Modelo Adaptativo de Conforto Térmico

Em oposição à abordagem estática, o modelo de conforto adaptativo considera a capacidade humana de se ajustar ao ambiente. Este paradigma reconhece a participação ativa dos usuários no ajuste de suas percepções térmicas, afastando-se da visão de que o balanço de calor é o único meio de aclimatação. A teoria do conforto adaptativo baseia-se na premissa de que o bem-estar térmico em ambientes naturalmente ventilados não dependem apenas dos fatores imediatos, mas também de uma série de mecanismos de adaptação.

A adaptação humana ao ambiente pode ser categorizada em três tipos: Fisiológica, que envolve mudanças biológicas no corpo para se ajustar a um clima particular, como a capacidade de um indivíduo tolerar temperaturas mais elevadas após exposição prolongada ao calor; Comportamental, que refere-se às ações conscientes tomadas pelas pessoas para melhorar a percepção e a sensação de conforto térmico, como ajustar a vestimenta ou abrir janelas para aumentar a velocidade do ar; Psicológica, baseada nas influências das expectativas e da percepção de controle sobre o ambiente.

O modelo adaptativo considera como adaptação ao conforto as ações do usuário que variam suas sensações e percepções de conforto no ambiente, como a possibilidade de abrir ou fechar janelas para controlar os efeitos do vento.

A abordagem adaptativa do conforto térmico surgiu na década de 1960, com os estudos de Humphreys e Nicol (Medeiros, 2019), e ganhou impulso nos anos 1990 devido à crescente preocupação com a eficiência energética e a sustentabilidade. Bittencourt e Monteiro (2015) defendem que a avaliação fundamentada nesse modelo pode incentivar a construção de edifícios com menor impacto ambiental, ao propor intervenções passivas que otimizem o conforto térmico.

A principal diferença entre os modelos de conforto estático e adaptativo reside na relação entre a temperatura de conforto e a temperatura do clima externo. Enquanto o modelo estático assume uma temperatura neutra de conforto constante, o modelo adaptativo estabelece uma relação linear e positiva entre a temperatura de conforto e a temperatura externa média predominante. Isso significa que, à medida

que a temperatura externa sobe, a temperatura interna de conforto aceitável também aumenta, refletindo a aclimatação e as expectativas dos ocupantes.

A ABNT NBR 16401-2:2024, norma técnica brasileira para sistemas de ar-condicionado e ventilação, adota o modelo de conforto adaptativo para ambientes naturalmente ventilados. A variável de entrada para a zona de conforto é baseada na média ponderada exponencialmente das temperaturas do ar externo dos sete últimos dias antes da medição, uma metodologia que espelha o critério de temperatura externa prevalecente da norma internacional ASHRAE Standard 55. A norma brasileira também apresenta gráficos que correlacionam a velocidade do ar e o conforto térmico, permitindo a otimização de estratégias de ventilação passiva para ampliar a zona de conforto e, consequentemente, reduzir o consumo energético.

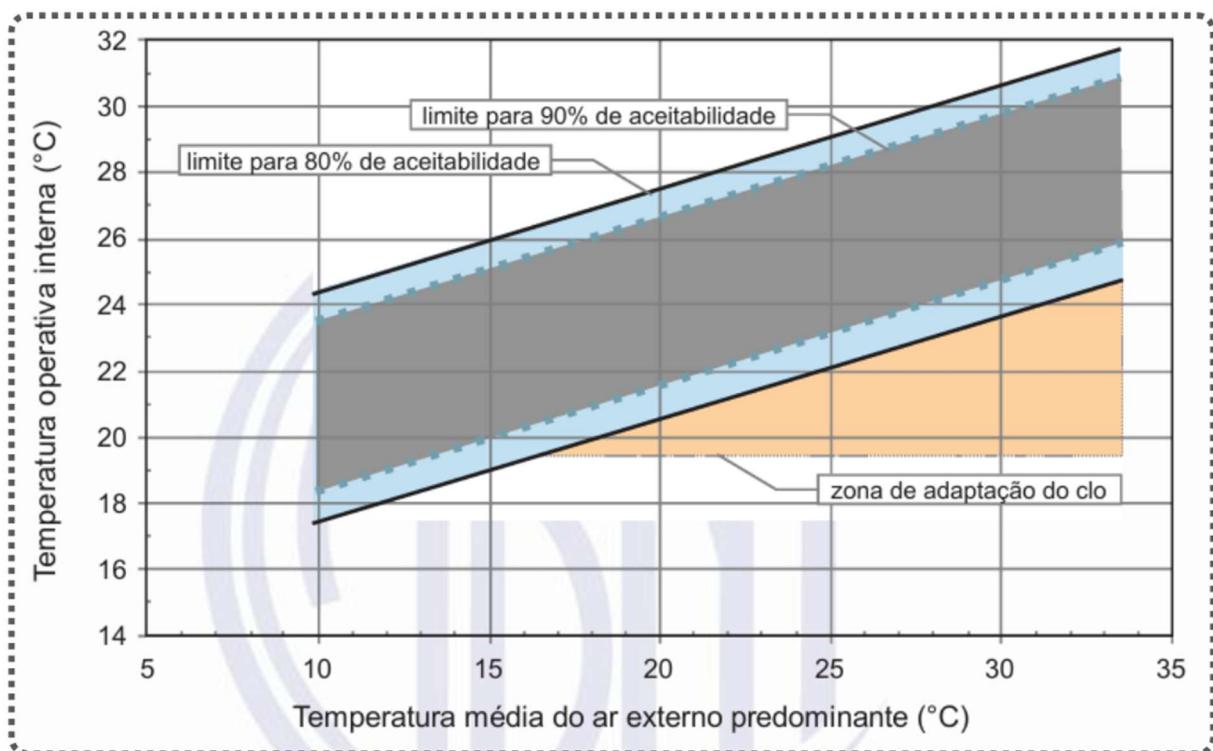
No modelo adaptativo, as condições térmicas aceitáveis são apresentadas pelos limites superiores e inferiores de aceitabilidade térmica, valores que indicam a satisfação de 80% dos usuários no ambiente avaliado (Figura 10). Esses valores são obtidos a partir da relação entre a temperatura operativa (T_o) e a temperatura média predominante do ar externo ($T_{mpa(ext)}$), podendo ser flexibilizados ao se considerar a velocidade do ar (Var).

A NBR 16401-2:2024 especifica os critérios para aplicabilidade da metodologia adaptativa. A norma determina que o ambiente avaliado não deve ter nenhum equipamento de condicionamento artificial em operação no momento da medição, que deve ter usuários desenvolvendo atividades com nível metabólico entre 1,0 e 1,5 met (equivalente a atividades em nível sedentário), com nível de isolamento de vestimenta que podem variar entre 0,5 e 1,0 clo, e que a temperatura predominante do ar externo esteja entre 10°C e 33,5°C.

A Temperatura Operativa (T_o), expressa em °C, refere-se à temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual o ocupante trocaria a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real não uniforme (ABNT NBR 16401-2, 2024). Os valores a serem mensurados para obter a temperatura operativa são a temperatura do ar, a temperatura radiante média e o coeficiente de ajuste em função da velocidade do ar. Para a aplicação do modelo adaptativo, a temperatura operativa interna admissível deve ser determinada a partir dos limites superior e

inferior de 80% de aceitabilidade. Esses limites são obtidos a partir da temperatura média predominante do ar externo dos sete dias anteriores à medição, os quais são obtidos através das observações de temperatura de bulbo seco ao ar livre durante às 24h dos sete dias sequenciais.

Figura 10 - Faixa de Temperatura Operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados.

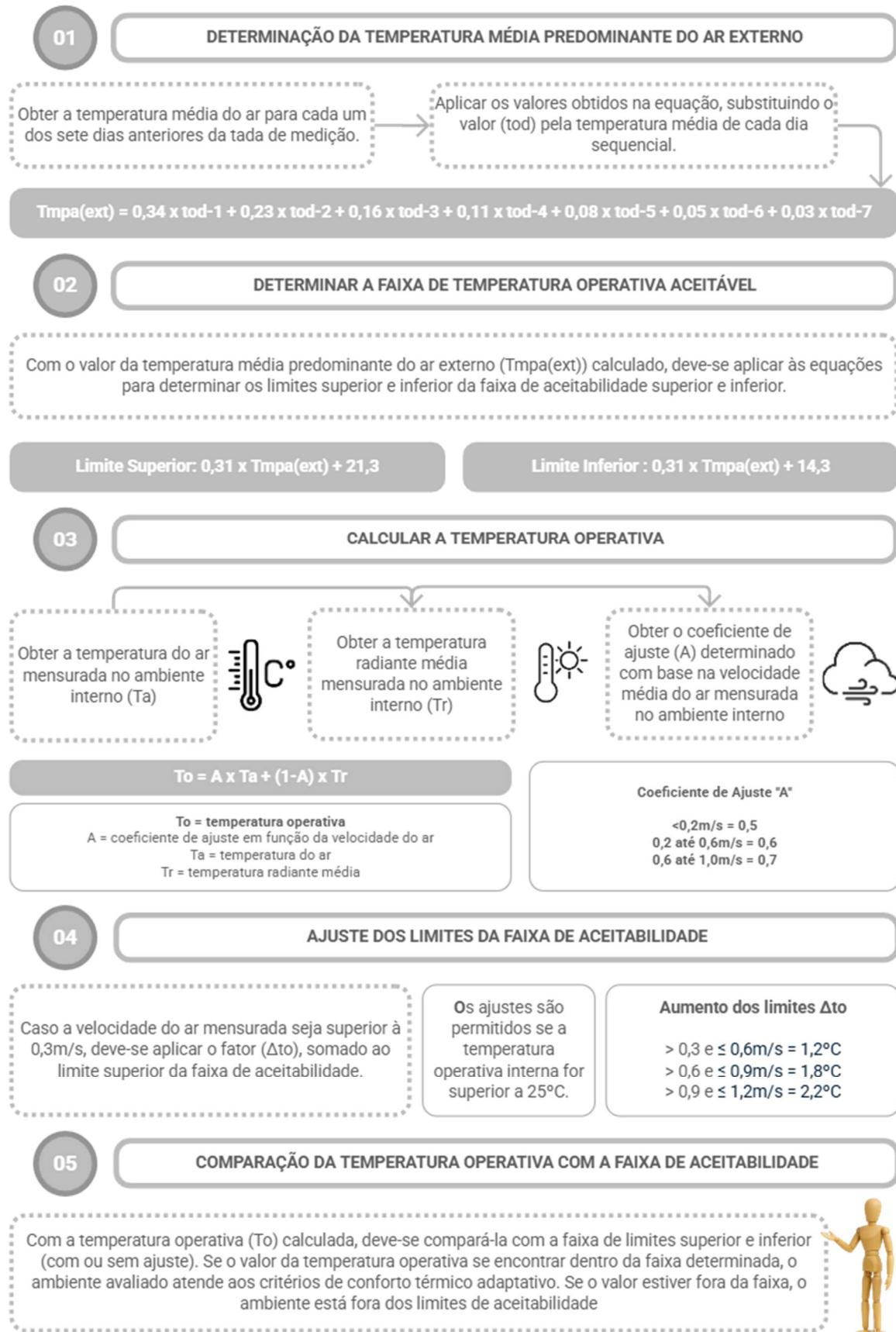


Fonte: ABNT NBR 16401-2, 2024.

As variáveis ambientais que devem ser mensuradas para a aplicação da metodologia adaptativa são: temperatura do ar, temperatura média radiante e velocidade do ar. Os efeitos de desconforto térmico local, bem como a influência da roupa, atividade metabólica e umidade do ar, já são considerados pelos limites da faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados (ABNT NBR 16401-2, 2024).

A sequência dos cálculos para obtenção dos valores de temperatura operativa, limites superior e inferior de aceitabilidade e temperatura média predominante do ar externo é apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Sequência de cálculos aplicados ao método adaptativo.



Fonte: Autor, 2025.

2.2.5 Panorama das Pesquisas Nacionais

No contexto brasileiro, diversos estudos têm investigado o conforto térmico em ambientes escolares, buscando compreender as condições existentes e propor melhorias para otimização dessa dimensão de conforto nos ambientes de aprendizagem.

Silveira et al. (2018) realizaram um estudo abrangente sobre o estado da arte das pesquisas nacionais de conforto térmico em salas de aula. A pesquisa analisou os métodos de avaliação mais utilizados em artigos científicos apresentados nos principais congressos da área no Brasil (ENTAC, ENCAC e NATAU) entre 2000 e 2017. Os resultados apontaram para uma predominância de métodos e técnicas tanto objetivos, como o uso de medição das variáveis ambientais e simulação computacional do desempenho térmico das edificações, quanto subjetivos, com a aplicação de questionários e entrevistas semiestruturadas sobre satisfação, preferência e percepção térmica dos usuários.

Em relação aos modelos de predição do conforto térmico, o estudo destacou a ampla aplicação do modelo estático de Fanger (1970) e uma crescente utilização do modelo adaptativo de Humphreys (1976). A justificativa para essa crescente utilização reside na sua incorporação em normativas de predição do conforto térmico no âmbito nacional, como a NBR 16401-2:2024, quanto no internacional, a exemplo da ASHRAE 55:2017.

V. Araújo (1996) dedicou-se a determinar parâmetros de conforto térmico para o litoral nordestino potiguar, conduzindo uma avaliação em escolas de Natal/RN, cidade inserida na zona bioclimática 8, caracterizada por microclima quente e úmido. O estudo utilizou a técnica de Avaliação Pós-Ocupação (APO) e métodos estáticos, mensurando as condições ambientais e coletando dados psicofisiológicos, bem como os graus de percepção, satisfação e preferência dos usuários. A comparação e correlação dessas variáveis visaram obter parâmetros de conforto térmico específicos para os ocupantes das edificações avaliadas. Os resultados, quando confrontados com modelos e zonas de conforto predeterminadas, como o modelo estático de Fanger (1970), a zona de conforto de Olgay (1963) e a zona de conforto

de Givoni (1992), revelaram a necessidade de reconsiderar os métodos de avaliação para as características climáticas brasileiras.

A análise estatística das variáveis mensuradas permitiu definir parâmetros nos quais os usuários se encontram em conforto térmico (Tabela 01), com limites de temperatura de bulbo seco de 25,1°C (inferior) e 28,1°C (superior). Nas considerações finais, é apontada a necessidade de considerar as características construtivas das edificações escolares estudadas para correlacionar os dados encontrados com a inércia térmica das edificações, visando comprovar as recomendações de projeto (Araújo, V., p. 120, 1996).

Tabela 01 – Parâmetros de conforto térmico em edifícios escolares na cidade de Natal/RN.

VARIÁVEL AMBIENTAL	PARÂMETROS	
Temperatura de bulbo seco	25,1°C	28,1°C
Temperatura de bulbo úmido	22,3°C	24,3°C
Temperatura de globo	25,3°C	28,5°C
Temperatura média radiante	25,9°C	29,2°C
Velocidade do ar	0,12m/s	0,83m/s
Umidade relativa do ar	69%	92%

Fonte: Araújo, 1996, adaptado pelo autor, 2025.

M, Araújo (2018) investigou o limite inferior da zona de conforto térmico para o clima quente e úmido de Maceió/AL, avaliando salas de aula em edificações escolares. Os resultados indicaram que a velocidade do ar é a variável ambiental que mais influencia a sensação de frio relatada pelos usuários. O estudo revelou que, para temperaturas entre 24,5°C e 26,5°C, a velocidade do ar apresentou valores mais elevados, e os questionários de satisfação registraram um leve desconforto para o

frio com maior frequência nessas condições, em comparação com dados obtidos a uma temperatura em torno de 25,5°C onde registros inferiores de velocidade do ar causaram uma sensação de leve desconforto por calor.

Souza et al. (2019) apresentam os resultados da avaliação de conforto térmico em duas escolas públicas municipais de João Pessoa/PB. A pesquisa combinou medição de variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do ar) com a aplicação de questionários de percepção, sensação e preferência térmica dos usuários. Os dados foram comparados com os limites de temperatura operativa aceitáveis obtidos pela aplicação do modelo adaptativo de conforto térmico. Os resultados indicaram que uma parcela significativa dos usuários (45,53%) relatou desconforto térmico por calor em uma temperatura média de 28,78°C.

Medeiros (2019) investigou o desempenho térmico de duas edificações escolares no semiárido potiguar, em Caicó/RN, região de clima quente e seco. A metodologia empregou a avaliação do conforto térmico por meio de medições das variáveis ambientais, utilizadas para determinar as condições higrotérmicas dos ambientes ocupados e para o cálculo dos limites superiores e inferiores de aceitabilidade térmica do modelo adaptativo. No estudo, foram comparadas as características arquitetônicas das escolas com os resultados das medições. A análise revelou que as condições da envoltória de uma das escolas foram cruciais para um melhor desempenho térmico, resultando em melhores níveis de satisfação térmica dos usuários.

Liguori e Labaki (2020) avaliaram o conforto térmico em salas de aula de duas escolas estaduais em Campinas/SP, correlacionando os índices de conforto previstos pelo modelo adaptativo com as respostas de sensação térmica dos usuários. Os resultados deste estudo corroboram as conclusões de Kowaltowski et al. (2001), que também identificaram a ocorrência de desconforto térmico devido ao calor em ambientes escolares na mesma região.

Abreu et al. (2018) realizaram uma avaliação comparativa do conforto térmico em edificações residenciais localizadas em Florianópolis/SC. O estudo teve como base os índices da zona de conforto proposto por Givoni (1992) e dados subjetivos de

sensação térmica dos usuários. O principal objetivo era avaliar a eficácia da Carta Bioclimática de Givoni como ferramenta para estimar a sensação de conforto térmico. Como procedimentos metodológicos, os pesquisadores mediram temperatura e umidade relativa do ar nos ambientes internos de cinco residências e aplicaram questionários de sensação, preferência e percepção térmica durante seis meses entre 2016 e 2017.

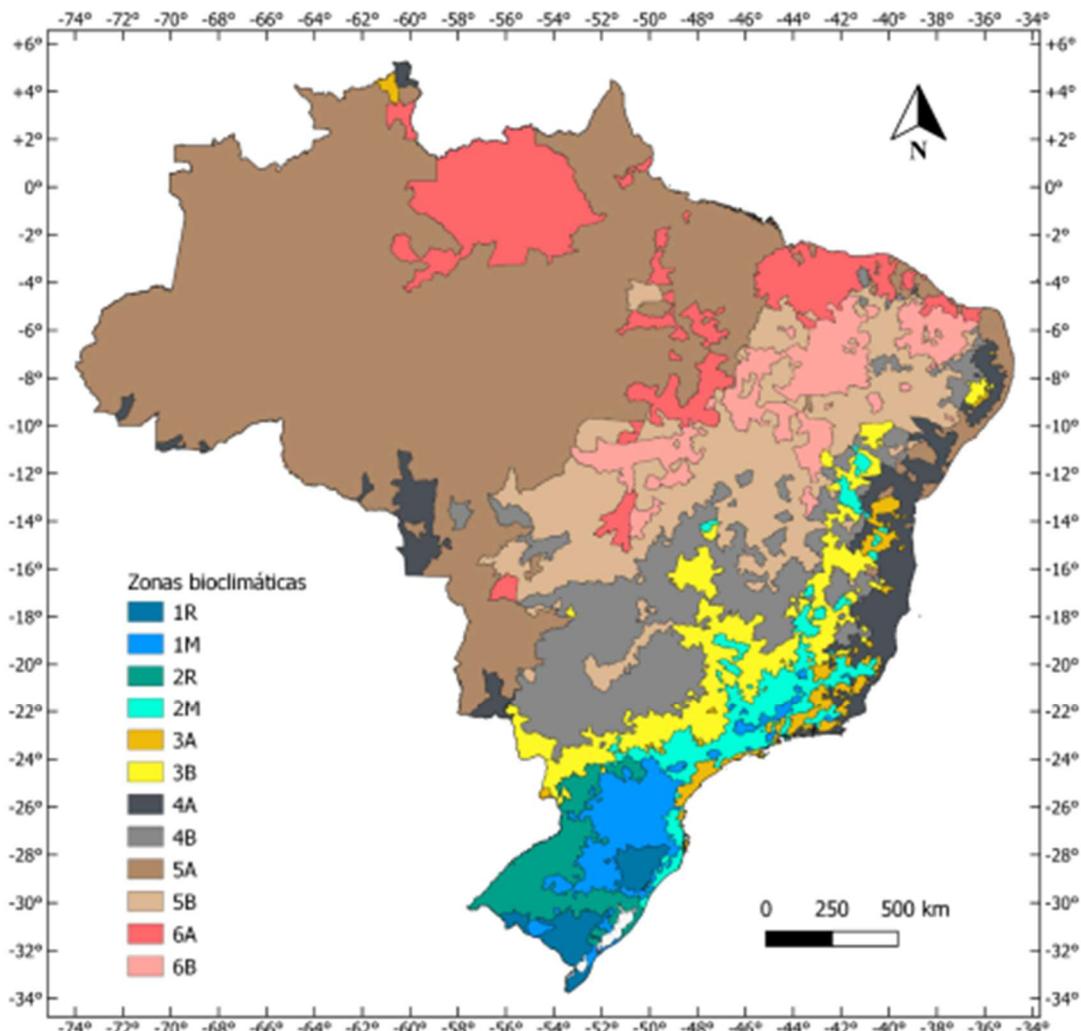
Os dados obtidos foram plotados no software Analysis Bio para representação gráfica dos valores mensurados na carta psicométrica, juntamente com as zonas de conforto de Givoni. Os autores salientam a importância de se considerar que as zonas bioclimáticas possuem limites bem definidos, pois uma variação de apenas 0,1 pontos percentuais nas variáveis ambientais pode significar que um dado se enquadre ou não na zona de conforto. Os resultados indicam que os usuários avaliados demonstram satisfação térmica mesmo com umidades relativas do ar superiores às indicadas na zona de conforto da carta psicométrica, o que é justificado pelos efeitos da ventilação existente e pelos processos de aclimatação dos usuários.

2.3 ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO

Edificações termicamente eficientes integram em sua arquitetura estratégias capazes de otimizar as condições térmicas dos ambientes internos. Essas estratégias se fundamentam nos estudos aplicados à bioclimatologia, área que investiga as relações entre o clima e o ser humano (Bogo et al., 1994).

A versão mais recente da norma brasileira de desempenho térmico, ABNT NBR 15220-2:2024, apresenta uma atualização significativa do zoneamento bioclimático nacional. Diferentemente da versão anterior, que dividia o território brasileiro em oito zonas, a nova edição estabelece 12 zonas bioclimáticas, resultantes da revisão de dados climáticos recentes e do aperfeiçoamento metodológico da classificação. Essa atualização oferece uma leitura mais precisa das variações térmicas e higrométricas do país (Figura 12).

Figura 12 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro.



Fonte: ABNT NBR 15220-3, 2024.

Embora a nomenclatura e o agrupamento tenham sido revisados, a lógica que sustenta as estratégias de projeto permanece vinculada às características climáticas predominantes de cada região. As áreas anteriormente classificadas como Zona Bioclimática 8, caracterizadas pelo clima quente e úmido, passam agora a integrar a Zona Bioclimática 5A.

A manutenção das recomendações bioclimáticas indicadas na versão anterior da ABNT NBR 15220-3 justifica-se pelo fato de que os princípios que regem o conforto térmico em climas quentes e úmidos permanecem inalterados do ponto de vista da bioclimatologia. Embora a atualização normativa de 2024 tenha ampliado e

refinado o zoneamento bioclimático, ela não altera os fundamentos que orientam o comportamento térmico das edificações nesses contextos climáticos. Assim, optou-se por preservar as diretrizes anteriormente estabelecidas, sobretudo aquelas relacionadas ao sombreamento efetivo das superfícies expostas e à ampliação da ventilação natural.

Essas estratégias mantêm-se essenciais pois derivam das análises bioclimáticas consolidadas nas cartas de Olgay e Givoni, conforme apresentado no item 2.2 deste trabalho. Ambas evidenciam que, em regiões de altas temperaturas combinadas a elevada umidade relativa do ar – condição típica das zonas quentes e úmidas -, o resfriamento passivo por ventilação e a redução do ganho térmico por sombreamento são medidas fundamentais para minimizar o desconforto térmico.

2.4 DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

O desempenho térmico refere-se à capacidade da envoltória de uma edificação de proporcionar conforto térmico no ambiente interno por meio da relação entre o objeto edificado e as condições climáticas externas (Mendes et al., 2013). Uma edificação com bom desempenho térmico controla de forma eficaz as condições internas, contribuindo significativamente para sua eficiência energética (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

A ABNT NBR 15220-3:2024, que trata do desempenho térmico de edificações, estabelece que a avaliação pode ocorrer tanto na etapa de projeto quanto após a construção. Para edificações existentes, essa análise é realizada por medições das variáveis ambientais e físicas in loco.

A norma ABNT NBR 15575:2021, voltada ao desempenho de edificações residenciais, define requisitos de habitabilidade, incluindo o desempenho térmico. Os níveis de atendimento – mínimo, intermediário e superior – baseiam-se em critérios relacionados à transmitância, capacidade térmica e porcentagem de aberturas. Para atendimento ao nível mínimo, pode-se utilizar o procedimento simplificado. Processos de simulação computacional são solicitados quando existe a necessidade de alcançar níveis intermediário e superior, sendo aplicável em todos os níveis de atendimento,

onde são simulados e comparados o modelo real da edificação com o modelo de referência.

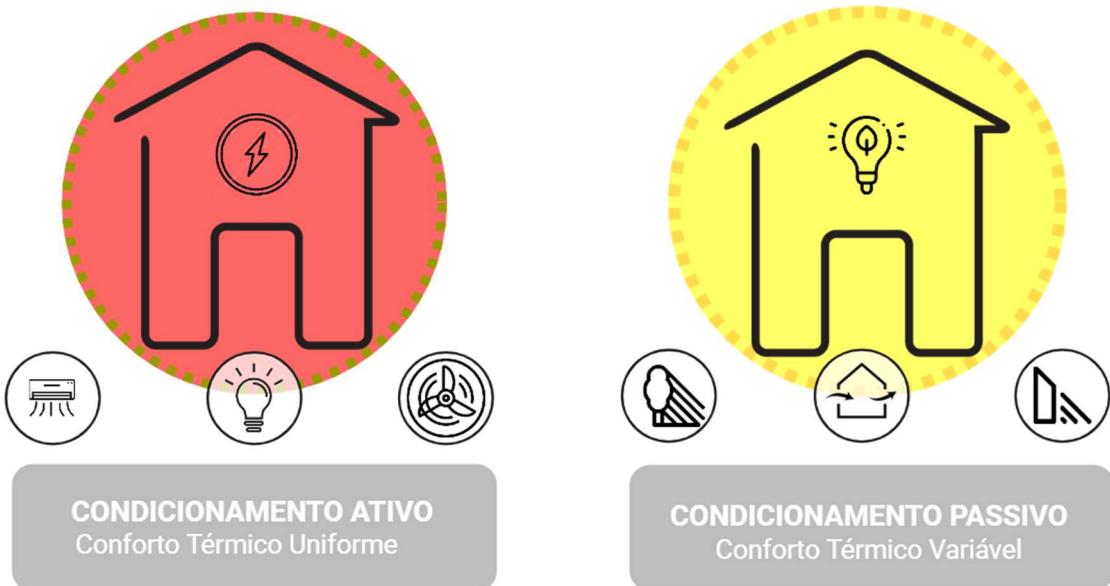
Segundo Negreiros (2010), o desempenho térmico está diretamente relacionado aos fluxos de calor e massa e ao balanço energético entre ambiente interno e externo. Em edificações com condicionamento passivo – que não utilizam energia para alcançar conforto – esse desempenho é determinado pela análise das variáveis ambientais. Quando o condicionamento é ativo, a eficiência térmica reflete também no consumo energético dos sistemas de climatização (Figura 13).

Nesse sentido, o condicionamento passivo pode ser exemplificado, para condições climáticas quentes e úmidas, por estratégias como o sombreamento de aberturas através de brises, beirais ou vegetação, a ventilação cruzada obtida pelo posicionamento adequado das esquadrias, o uso de materiais de alta refletância ou isolamento térmico na envoltória, além da adoção de soluções como coberturas ventiladas e paredes sombreadas. Tais dispositivos atuam diretamente na redução dos ganhos térmicos e na promoção de trocas convectivas, contribuindo para um ambiente interno mais estável sem a necessidade de consumo energético adicional.

Por outro lado, no condicionamento ativo, destacam-se sistemas como aparelhos de ar-condicionado, ventiladores mecânicos, climatizadores evaporativos e sistemas centralizados de HVAC, cuja operação depende de energia elétrica para controlar temperatura do ar e umidade relativa do ar. Nesses casos, o desempenho térmico da edificação influencia diretamente a eficiência desses equipamentos: quanto maiores os ganhos térmicos provenientes da envoltória, maior será o consumo energético necessário para manter as condições internas de conforto.

Independentemente da finalidade do edifício, o bom desempenho térmico proporciona benefícios como saúde, bem-estar, economia de energia e mitigação dos efeitos do aquecimento global. Ele é influenciado por três elementos principais: as condições climáticas, as propriedades térmicas dos materiais e a morfologia da edificação, cujo entendimento é fundamental para a tomada de decisões projetuais.

Figura 13 - Condicionamento Ativo e Passivo.



Fonte: Autor, 2025.

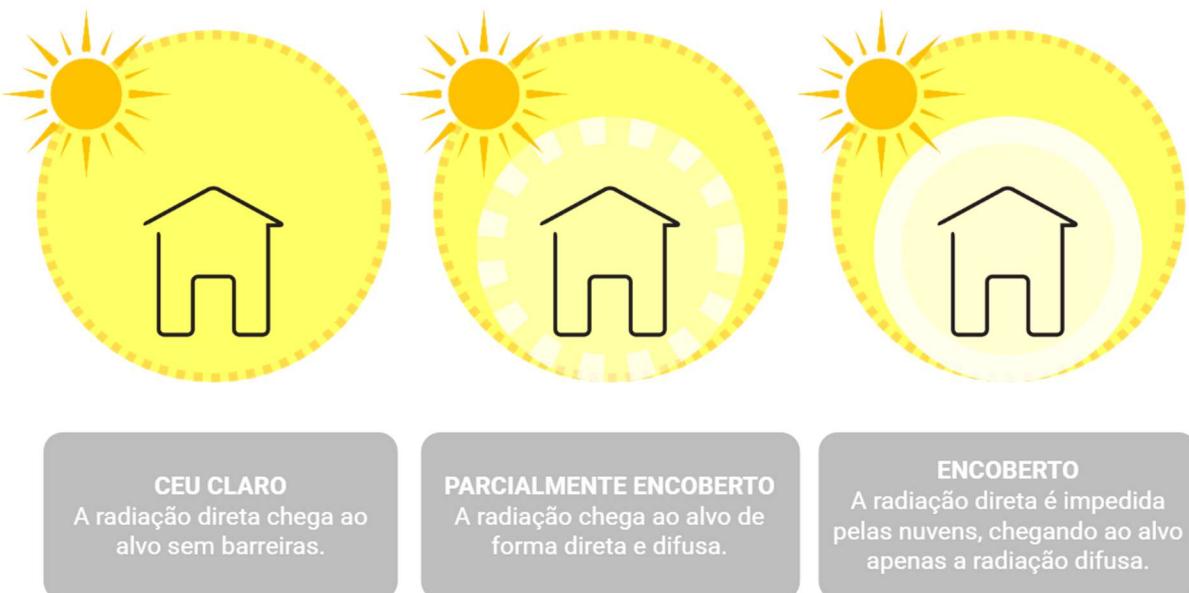
2.3.1 Fatores climáticos

Para alcançar um bom desempenho térmico, é fundamental considerar os fatores climáticos do local onde a edificação será implantada. Entre os elementos determinantes destacam-se a radiação solar e a temperatura e a umidade do ar além da ventilação.

A radiação solar é a principal fonte de energia do planeta (Bogo et al., 1994). Sua intensidade varia ao longo do ano e do dia, impactando diretamente o desempenho térmico das edificações. Essa variação é atribuída à inclinação da órbita elíptica da Terra, o que resulta em uma maior incidência de radiação nas regiões entre os trópicos de Câncer e Capricórnio (Frota; Schiffer, 2001).

Ao atingir a atmosfera, a radiação solar se manifesta de duas formas: direta e difusa. A radiação direta chega à superfície sem desvios, enquanto a difusa é dispersada por interferências, principalmente nuvens. Quanto mais limpo o céu, maior a proporção de radiação direta. Por outro lado, dias nublados resultam em maior radiação difusa, que se espalha e pode ser recebida de forma mais homogênea em todas as fachadas de um edifício (Figura 14) (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Figura 14 – Relação da radiação incidente para o céu claro, parcialmente encoberto e encoberto.



Fonte: Autor (2025).

Em climas frios, a radiação direta é benéfica, pois contribui para o aquecimento das superfícies. Já em climas quentes, é geralmente indesejável para evitar o superaquecimento, sendo preferível a radiação difusa, que proporciona iluminação natural sem ganhos excessivos de calor.

A temperatura do ar impacta significativamente o desempenho térmico e é uma consequência direta da radiação solar. Conforme explicam Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o ar não absorve diretamente os raios solares. Em vez disso, a radiação é absorvida pelo solo, que aquece e, por sua vez, transfere calor para o ar por convecção. A variação diária da temperatura do ar resulta de um balanço térmico que envolve a radiação solar direta, a capacidade de absorção e condutividade térmica do solo e dos materiais de construção, além das trocas de calor que ocorrem por evaporação, condução, convecção e radiação.

A umidade relativa do ar é um fator crítico para o desempenho das edificações, influenciando diretamente o conforto dos ocupantes. Suas flutuações, que são inversamente relacionadas à temperatura, afetam a forma como a radiação solar é absorvida e redistribuída na atmosfera pelo vapor d'água e pelas nuvens (Frota;

Schiffer, 2001; Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). A alta umidade compromete o conforto térmico interno, mesmo em temperaturas amenas, pois dificulta a evaporação do suor da pele, um mecanismo essencial para a regulação da temperatura corporal. A umidade do ar é regulada naturalmente pela vegetação e pelo ciclo hídrico, mas em ambientes urbanos, a falta de vegetação e o excesso de pavimentação podem reduzi-la, alterando o microclima local.

O vento é um elemento crucial no desempenho térmico, resultante do aquecimento desigual da Terra pela radiação solar. A ascensão do ar quente em latitudes mais baixas e a entrada de ar frio das regiões polares geram os padrões de ventos globais. A topografia, a vegetação e a rugosidade da malha urbana influenciam a direção e a velocidade do vento. As edificações podem desviar, canalizar ou bloquear o fluxo de ar, impactando a ventilação natural dos ambientes (Frota; Schiffer, 2001). Em climas quentes e úmidos, o aproveitamento dos ventos dominantes é extremamente benéfico para promover o conforto térmico, auxiliando na dissipação das massas térmicas por meio das trocas de calor.

Em síntese, os fatores climáticos abordados – radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e vento – estão intrinsecamente interligados e são a base para o desempenho térmico de uma edificação, sendo considerado a radiação solar o ponto de partida que condiciona de forma direta e indireta os outros fatores climáticos.

2.3.2 Propriedades Térmicas dos Materiais da Envoltória

Além dos fatores climáticos, as propriedades térmicas dos materiais influenciam diretamente o desempenho da envoltória de uma edificação e, consequentemente, o conforto térmico interno. A forma como uma matéria interage com a radiação solar e permite a troca de calor entre os ambientes interno e externo depende de características como absorvividade, refletividade, emissividade, condutividade, resistência, transmitância e capacidade térmica.

Conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a radiação que incide sobre uma superfície se divide em três partes: refletida (ρ), absorvida (α) e, no caso de materiais

transparentes, transmitida. A absorvividade indica a capacidade do material de absorver radiação. Materiais de cores escuras tendem a absorver mais radiação, enquanto os de cores claras apresentam maior refletividade, rebatendo a radiação incidente e, assim, reduzindo o ganho térmico. Já a emissividade (ϵ) é a propriedade que determina a quantidade de energia térmica que a superfície de um material emite para o ambiente (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

A condutividade térmica (λ) representa a capacidade de um material conduzir calor, enquanto a resistência térmica (R) indica sua capacidade de resistir à transferência de calor. Quanto maior a espessura e menor a condutividade, maior será a resistência térmica (Mendes et al., 2023). Por sua vez, a transmitância térmica (U), que é o inverso da resistência, é essencial para avaliar o desempenho da envoltória, pois indica a taxa de transferência de calor através do material (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014); Mendes et al., 2023). Materiais com maior espessura e menor condutividade apresentam menor transmitância térmica, o que reduz o ganho ou a perda de calor (Mendes et al., 2023).

A capacidade térmica de um material é definida pelo produto de seu calor específico, espessura e massa específica aparente (ABNT NBR 15220-2:2022). Esta propriedade é fundamental para a inércia térmica de um ambiente, pois indica a capacidade do material de armazenar calor. Materiais com alta capacidade térmica ajudam a reduzir flutuações de temperatura no interior da edificação, especialmente nos horários de pico de radiação solar (Mengjie et al., 2018 *apud* Mendes et al., 2023).

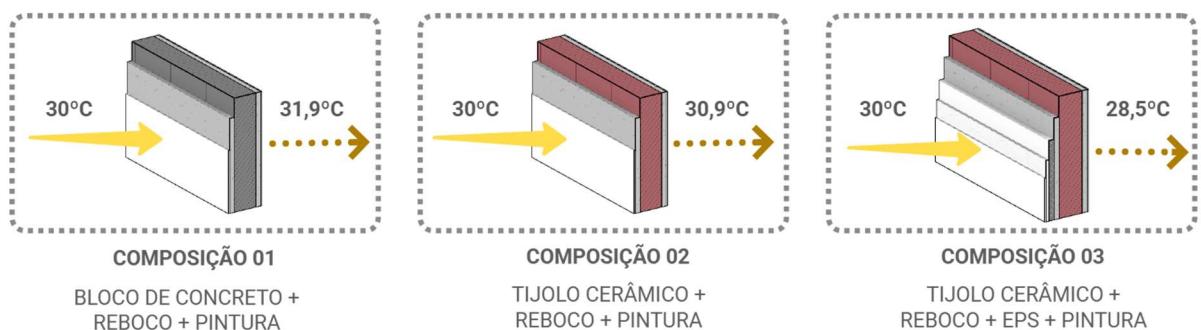
Pesquisas recentes destacam a crescente utilização de materiais alternativos que promovem a redução da temperatura interna por suas propriedades térmicas. Por exemplo, Aquino (2017) comparou telhas fabricadas a partir de embalagens de laticínios recicladas com telhas metálicas (aluzinco) e de fibrocimento. O estudo, realizado durante 12 dias, revelou que a telha ecológica reduziu a temperatura interna em 5,9% quando comparada à telha metálica. A adição de uma manta de alumínio, que reflete 85% da radiação incidente, contribuiu para a diminuição das flutuações térmicas.

Outro material com alto desempenho térmico é o Poliestireno Expandido (EPS), amplamente utilizado como um isolante em coberturas, forros, paredes e

revestimentos. Novais et al. (2014), em um estudo com edificações residenciais em Cuiabá/MT, constataram que o uso de painéis de EPS reduziu a temperatura interna em até 7°C, em comparação com alvenarias de tijolos cerâmicos.

Para ilustrar o impacto dessas propriedades, foram realizadas simulações comparando a transmitância térmica (U) e as relações de temperatura interna e externa com diferentes composições de alvenaria. Considerando uma temperatura do ar externa de 30°C, os resultados demonstraram que uma alvenaria de blocos de concreto (com reboco e pintura nas faces interna e externa) apresentou uma transmitância térmica de 4,6W/m²K, resultando em uma temperatura interna estimada de 31,9°C. Para uma alvenaria de blocos cerâmicos (com reboco e pintura nas faces interna e externa) apresentou uma transmitância de 3,69W/m²K, com uma temperatura interna de aproximadamente 30,9°C. A adição de uma camada de 2cm de EPS à alvenaria de blocos cerâmicos reduziu a transmitância térmica para 1,20W/m²K, resultando em uma temperatura interna de aproximadamente 28,5°C.

Figura 15 - Simulação transmitância térmica para diferentes composições de alvenaria.



Fonte: Autor (2025).

A partir dessas simulações, é possível compreender que a aplicação de diferentes materiais na envoltória pode melhorar significativamente o desempenho térmico da edificação. A inclusão de materiais com baixa absorvividade térmica, como o EPS na composição da parede, pode reduzir a temperatura interna em até 2°C, promovendo maior conforto e eficiência energética.

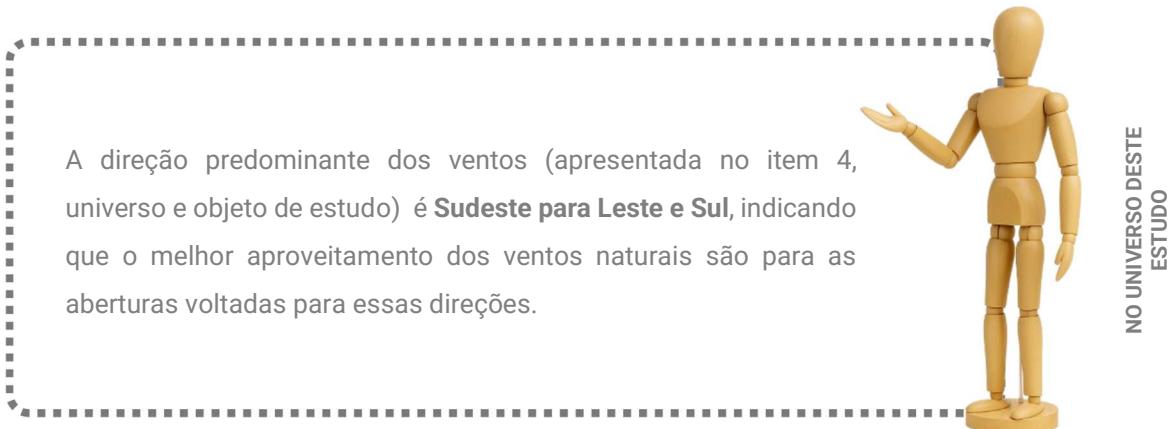
2.5 ESTRATÉGIAS DE PROJETO PARA A ZONA BIOCLIMÁTICA 5A

Com base no que foi apresentado, as principais estratégias de projeto para alcançar o desempenho térmico da edificação e garantir o conforto dos usuários em climas quentes e úmidos são a ventilação natural, o sombreamento adequado e a capacidade térmica dos materiais da envoltória.

2.5.1 Ventilação

A ventilação natural é a principal estratégia de condicionamento passivo para o conforto térmico de edificações na Zona Bioclimática 5A. Quando bem planejada, ela promove a troca contínua do ar quente interno por ar mais fresco, otimizando o desempenho térmico e o conforto dos usuários. A ventilação também é crucial para a desumidificação do ar em ambientes internos, um fator de grande importância em climas quentes e úmidos, como o de Macaíba/RN, foco deste estudo.

O primeiro passo para definir as melhores estratégias de ventilação é a compreensão da dinâmica dos ventos predominantes, o que pode ser obtido com a leitura da rosa dos ventos.



Estratégias como a ventilação cruzada são essenciais para aplicar esses conceitos na prática. Por meio de soluções arquitetônicas, a ventilação auxilia nos processos de balanço térmico por convecção e evaporação, dissipando o calor de forma eficaz.

Elementos externos, como a presença de outras construções e a vegetação podem influenciar a dinâmica da ventilação, criando barreiras que modificam o fluxo natural do vento. No entanto, esses elementos podem ser usados estratégicamente para direcionar e otimizar a circulação do ar.

A própria massa edificada pode funcionar como um elemento direcionador. Componentes arquitetônicos como brises e beirais influenciam o comportamento do vento, criando zonas de alta e baixa pressão. Por exemplo, quando o vento incide sobre uma fachada com uma abertura, a pressão do ar aumenta na face voltada para o vento (alta pressão) e diminui na face oposta (baixa pressão). Essa diferença de pressão atua como um captador de ar, permitindo que a ventilação atravesse a edificação e otimize o fluxo de ar interno.

Para otimizar a ventilação, consideram-se tanto estratégias externas quanto as de projeto. As estratégias externas não dependem da massa edificada, mas sim de sua relação com o entorno, o que inclui a orientação do edifício (para novos projetos) e sua interação com a vegetação e outras construções. O paisagismo, por exemplo, pode ser usado de forma estratégica para canalizar os ventos.

As estratégias de projeto condicionam a própria edificação. A ABNT NBR 15220-3:2021 estabelece que as aberturas de ventilação para a Zona Bioclimática 5A devem ser iguais ou superiores a 40% da área do piso do ambiente de uso prolongado. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) complementam essa diretriz, mostrando que a tipologia das janelas impacta a área útil de ventilação: os tipos de abrir e basculante são os mais eficazes, oferecendo quase 100% da área útil quando totalmente abertos.

Uma das técnicas mais eficientes é a ventilação cruzada, que consiste em ter pelo menos duas aberturas em lados opostos de um ambiente, permitindo a circulação do fluxo de ar e as trocas térmicas por convecção.

Elementos arquitetônicos, como brises, beirais, platibandas e peitoris ventilados, ajudam a captar e direcionar o vento para o interior. Por outro lado, as torres de ventilação captam e distribuem o ar internamente, ao mesmo tempo que levam o ar quente para fora.

Estratégias mais complexas, como envoltórias de segunda pele e áticos ventilados, promovem a captação, circulação e troca de calor, resfriando os materiais

da própria edificação. Na segunda pele, o resfriamento ocorre entre a camada externa e a vedação principal. Nos áticos ventilados, a troca de calor acontece entre a cobertura e a laje ou forro, dissipando o calor acumulado e auxiliando no resfriamento passivo reduzindo a temperatura do ar interno.

2.5.2 Sombreamento

O sombreamento, assim como a ventilação, é fundamental para o desempenho térmico de uma edificação. Sua principal função é evitar a incidência direta da radiação solar, prevenindo o aquecimento excessivo e mantendo os ambientes internos mais frescos.

As estratégias de sombreamento podem ser aplicadas de duas formas: sombreamento das alvenarias externas, que reduz o ganho de calor; e sombreamento das aberturas, que protege janelas, portas e elementos vazados.

Para definir as estratégias mais eficientes, é crucial compreender a geometria solar do local. Analisar a trajetória do sol permite dimensionar e aplicar dispositivos de proteção solar de maneira eficaz.

NO UNIVERSO DESTE
ESTUDO



A radiação solar pode atingir picos de mais de 5.800 Wh/m² em meses como outubro e novembro, o que representa uma carga térmica significativa para as edificações. Para ilustrar, essa quantidade de calor é equivalente ao que seria gerado por cerca de 102 lâmpadas incandescentes de 60W em um metro quadrado. Essa sobrecarga térmica, especialmente crítica nas fachadas leste e oeste que recebem radiação diária com ângulos de incidência baixos, destaca a necessidade de estratégias de controle solar para garantir o conforto térmico e o bom desempenho das construções.

Os elementos de proteção solar devem ser planejados na fase de projeto, considerando a geometria solar e os períodos de insolação, evitando sua inserção aleatória. Essa abordagem também é crucial para adequar edificações já existentes.

Os beirais de coberturas e as marquises são excelentes estratégias para proteger as alvenarias em horários de sol a pino. Para o sombreamento das aberturas, podem ser aplicadas diversas soluções arquitetônicas: marquises, brises (verticais e horizontais) e proteções laterais e frontais com o uso de elementos sólidos ou vazados, como o cobogó.

O uso da vegetação como estratégia de sombreamento é muito eficaz. Além de bloquear a radiação direta, a vegetação mantém suas superfícies com temperaturas baixas, irradiando pouco calor e reduzindo a sensação térmica.

O sombreamento é uma estratégia indispensável para o conforto térmico, pois reduz a temperatura das superfícies, diminuindo a irradiação de calor. Ao sombrear, as superfícies mantêm uma temperatura próxima à do ar. Portanto, além de um dimensionamento correto dos dispositivos de proteção solar, é fundamental considerar as características térmicas dos materiais utilizados.

2.5.3 Capacidade térmica dos materiais

A forma como os materiais da envoltória interagem com o ambiente externo é crucial para o desempenho térmico. Essa interação está diretamente ligada à radiação e às trocas térmicas nas superfícies.

A radiação solar que incide sobre uma superfície pode ser refletida, absorvida ou transmitida. Materiais de cores escuras têm alta absorvividade e aquecem mais. Já materiais de cores claras, com alta refletividade, minimizam o ganho de calor. A emissividade – a capacidade de um material emitir energia térmica – também afeta a temperatura das superfícies. Superfícies translúcidas, como os vidros de fechamento ou de esquadrias, têm um comportamento diferente, permitindo que a radiação solar passe diretamente para o interior da edificação, o que pode causar um grande ganho de calor, por isso, a escolha e o tratamento dos vidros são tão importantes quanto a

seleção dos materiais opacos. Para maximizar o desempenho térmico e o conforto, especialmente em climas quentes, é fundamental escolher materiais que favoreçam o resfriamento passivo.

Para paredes e coberturas, recomenda-se o uso de materiais leves e refletores para evitar o acúmulo de calor. Revestimentos claros permitem a refletância, garantindo que a maior parte da radiação solar seja refletida.

Para coberturas, a leveza é fundamental para evitar a inércia térmica indesejada. A norma indica que telhas em material cerâmico são aceitáveis, desde que não sejam pintadas ou esmalтadas, pois a superfície natural do barro é eficaz para mitigar o ganho de calor. Essa estratégia, aliada ao uso de forro, torna-se ainda mais eficiente, pois o forro cria uma camada adicional que dificulta a passagem da carga térmica. As coberturas exigem atenção especial, pois, devido à sua posição horizontal, recebem a maior incidência de radiação solar direta. No universo deste estudo, que está situado próximo à linha do Equador, essa exposição é ainda mais intensa durante todo o ano, o que as torna os elementos que mais contribuem para o aquecimento da edificação.

No entanto, o desempenho térmico em contexto climático quente e úmido também pode ser alcançado com o uso de materiais pesados para a envoltória. Essa abordagem se baseia no princípio da inércia térmica, onde paredes mais espessas absorvem calor durante o dia e o liberam para o interior apenas durante a noite. Esse atraso na transmissão, combinado com a queda da temperatura externa noturna, permite que o ambiente interno se mantenha fresco ao longo do dia. Essa estratégia é complementada pela refletância na face externa do material da envoltória, minimizando ainda mais a carga térmica.

A escolha dos materiais de piso também é importante. Um piso interno que recebe radiação solar pode refletir e transmitir calor por condução. Definir materiais com propriedades térmicas eficientes ajuda a reduzir a temperatura do ar interno.

Da mesma forma, as características térmicas dos pisos externos influenciam a temperatura do ar no entorno. Materiais como concreto e asfalto tendem a aquecer mais que superfícies naturais como a grama e o solo. A escolha de pisos externos

com alto albedo ou o uso de áreas verdes pode, portanto, reduzir a carga térmica no entorno.

A aplicação dessas estratégias pode variar dependendo da fase da edificação. Para novos projetos, é possível escolher materiais leves e refletores ou pesados para inércia térmica. Em edificações existentes, a intervenção foca na aplicação de materiais sobre as superfícies. Para mitigar o ganho de calor, podem ser usados revestimentos externos de cores claras. Para retardar a transmissão de calor, materiais isolantes como o Poliestireno Expandido (EPS) podem ser aplicados em forros, paredes ou revestimentos internos.

As diretrizes de ventilação, sombreamento e capacidade térmica dos materiais, embora abordadas separadamente, funcionam de maneira interconectada, formando um sistema de estratégias bioclimáticas para o condicionamento passivo do desempenho térmico das edificações que visam alcançar o conforto térmico dos usuários.

O sombreamento, por exemplo, não apenas impede o ganho de calor excessivo, mas também cria condições favoráveis para que a ventilação natural seja mais eficaz. Ao proteger superfícies e aberturas da radiação solar, a temperatura do ar interno e das próprias superfícies se mantém mais baixa, isso permite que o fluxo de ar fresco promovido pela ventilação dissipe o calor residual com maior eficiência, otimizando o conforto térmico sem a necessidade de sistemas mecânicos de resfriamento.

Essa integração é complementada pela escolha estratégica dos materiais. O uso de materiais com alta refletividade e baixa absorvidade, como os recomendados para coberturas e paredes, diminui a quantidade de calor que precisa ser dissipada pela ventilação e controlada pelo sombreamento. Dessa forma, a aplicação conjunta dessas estratégias amplifica seus efeitos, tornando a edificação um ambiente mais resiliente às condições ambientais.

03

REFERENCIAL EMPÍRICO

A sessão de referencial empírico reúne a análise de estudos de caso que ilustram a aplicação prática das estratégias bioclimáticas discutidas no referencial teórico, com o objetivo de compreender como essas soluções são incorporadas em edificações existentes, destacando seus resultados positivos e limitações. Serão analisadas três edificações localizadas em clima quente e úmido, sendo um estudo de caso direto e dois estudos de caso indiretos, em climas análogos ao do universo de estudo. A análise busca consolidar a base empírica necessária para subsidiar a elaboração da cartilha, direcionada a otimização do conforto térmico em escolas situadas em regiões de clima quente e úmido.

3.1 ESTUDO DE CASO DIRETO

O estudo de caso direto apresenta os resultados obtidos a partir da visita técnica realizada em 28 de maio de 2025 ao Centro Estadual de Educação Profissional Professora Amazonina Teixeira de Carvalho (CEEP Amazonina), localizado no bairro Mangabeira, em Macaíba, Rio Grande do Norte (Figura 17).

Figura 16 - Imagem da fachada frontal e pátio interno do CEEP Amazonina.



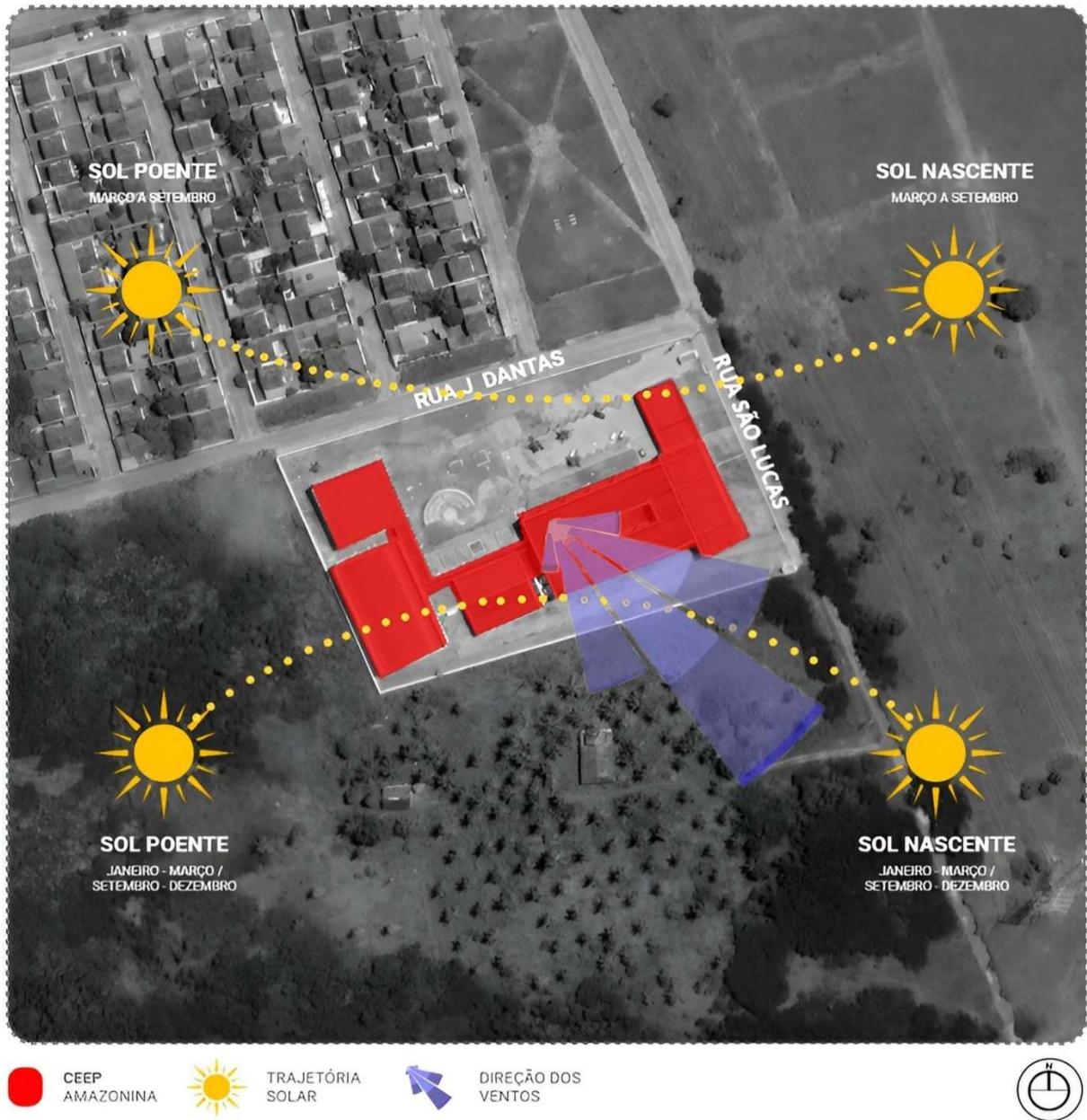
Fonte: Autor, 2025.

A escola encontra-se em uma área de baixa densidade urbana, caracterizada pela predominância de ocupações residenciais e por extensas áreas não edificadas.

A edificação possui fachadas principais voltadas para Norte e Sul, com aberturas orientadas para Sudeste, aproveitando os ventos predominantes e favorecendo a ventilação cruzada.

As fachadas Leste e Oeste concentram a radiação solar direta nos períodos da manhã e da tarde, enquanto a insolação incide com predominância nas fachadas do eixo Norte de março a setembro e nas de eixo Sul de janeiro a março e de setembro a dezembro (Figura 18).

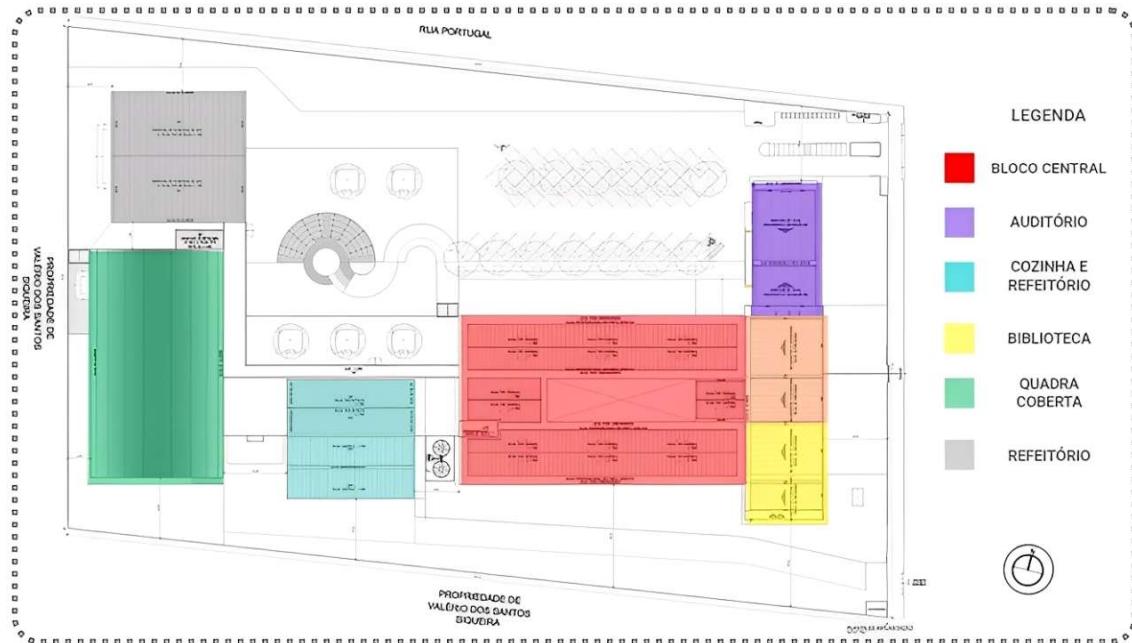
Figura 17 - Localização CEEP Amazonina.



Fonte: Autor, 2025.

O programa arquitetônico organiza-se em um bloco central de dois pavimentos, que abriga o setor administrativo, os laboratórios e as salas multifuncionais no pavimento térreo, além das salas de aula no pavimento superior. Complementam o conjunto o auditório e a biblioteca com mezanino, localizados a leste, e, a oeste, a cozinha, o refeitório, a quadra poliesportiva coberta e o galpão multifuncional (Figura 19).

Figura 18 - Conjunto arquitetônico do CEEP Amazonina.



Fonte: SCMCE, SEEC/RN. Editado pelo Autor, 2025.

A envoltória da edificação é composta por alvenaria estrutural de blocos de concreto, com acabamento externo em textura branca e faixa lavável em cerâmica nos ambientes internos dos blocos principais. A cobertura é formada por laje em concreto e telhado de fibrocimento, delimitado por platibanda de alvenaria.

A visita à escola ocorreu das 9h às 11h, em condições climáticas de céu claro e temperatura externa média de 29°C. O objetivo principal foi identificar as estratégias bioclimáticas empregadas na edificação, de construção relativamente recente, e avaliar sua eficiência por meio da análise do conforto térmico percebido pelos usuários. A abordagem combinou: análise do espaço edificado; medições de variáveis objetivas e coleta de dados subjetivos junto aos usuários. Além disso, a visita também serviu como testagem da metodologia de avaliação do conforto térmico aplicada posteriormente ao objeto de estudo principal deste trabalho, apresentado no item 4.

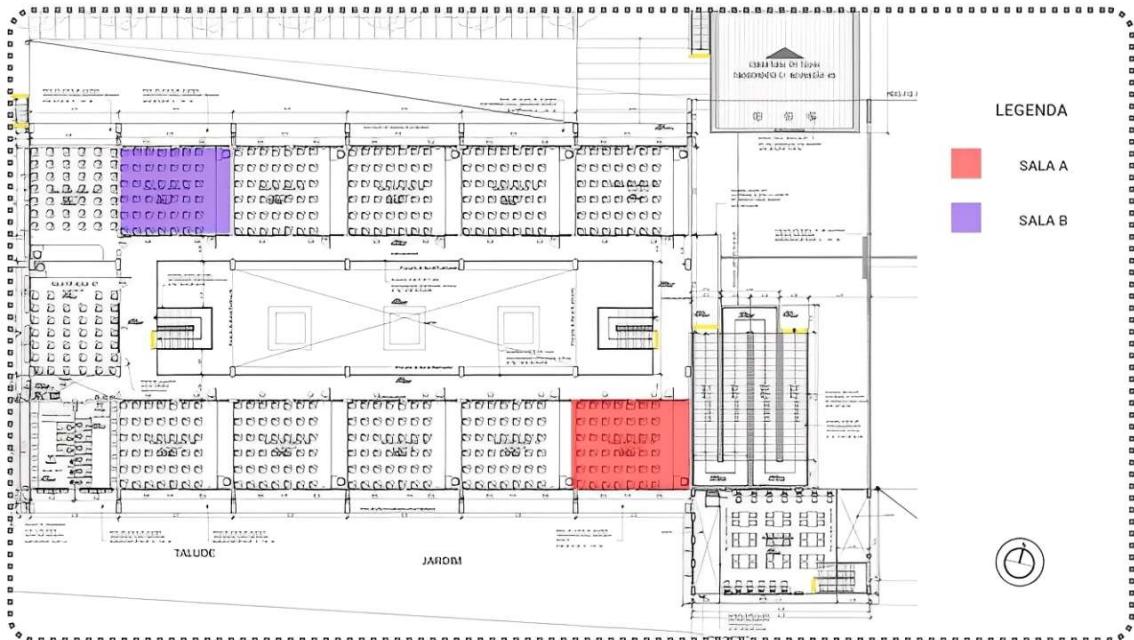
Para a coleta de dados objetivos, foram utilizados: um Termo-Higro-Sonômetro-Luxímetro Digital modelo THDL-400, para aferição da temperatura do ar nos ambientes internos; um Termômetro Infravermelho Digital modelo TI-430; e uma Câmera Termográfica Flir C2, ambos empregados na medição das temperaturas

superficiais. Os equipamentos foram disponibilizados pelo Curso de Arquitetura e Urbanismo do Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN).

A aferição das variáveis subjetivas foi realizada por meio de conversas com usuários (professores e alunos) durante o processo de medição, solicitando informações sobre percepções térmicas tanto no momento da visita quanto em outros períodos, a fim de compreender o desempenho térmico da edificação em diferentes situações.

Para a medição das variáveis objetivas internas foram selecionadas, com apoio dos professores, duas salas de aula representativas de desconforto térmico por calor, ambas localizadas no pavimento superior do bloco central: uma na fachada Norte e outra na fachada Sul (Figura 20).

Figura 19 - Localização das salas de medição.



Fonte: SCMCE, SEEC/RN. Editado pelo Autor, 2025.

A edificação adota diferentes estratégias de projeto bioclimático, contemplando três categorias principais: ventilação, sombreamento e materiais da envoltória.

No que se refere à ventilação, a escola dispõe de aberturas em paredes opostas, o que favorece a ventilação cruzada. As maiores aberturas estão voltadas para o Norte e Sul, permitindo a entrada do ar proveniente da ventilação prevalecente sudeste da região. As esquadrias são grandes, do tipo correr, possibilitando entrada de ar quando abertas (Figura 21).

Figura 20 - Aberturas das salas de aula voltadas para o pátio interno e fachada externa da edificação.



Fonte: Autor, 2025.

A edificação conta com cobertura nas circulações internas e beirais nas fachadas Norte e Sul, que sombreiam parcialmente as alvenarias e aberturas, sobretudo quando o Sol está a pino (Figura 22).

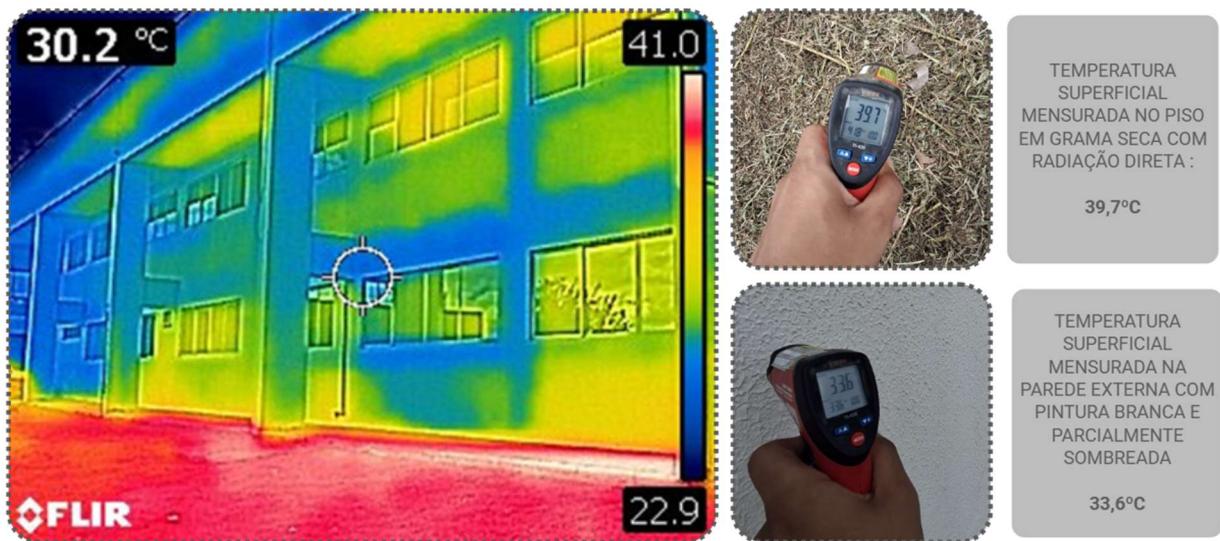
As alvenarias externas recebem pintura branca, o que auxilia na redução da absorção de calor ao refletir parte da radiação solar direta. A Figura 26 apresenta os efeitos dessa capacidade reflexiva, evidenciando a diferença de temperatura superficial entre o solo exposto e a parede pintada de branco sob sombreamento parcial.

Figura 21 - Beirais nas fachadas Norte e Sul do Bloco Central.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 22 - Temperatura Superficial da Fachada Externa Norte.



Fonte: Autor, 2025.

Apesar das estratégias adotadas, a avaliação revelou sua baixa eficiência. Embora as dimensões e posicionamento das aberturas favoreçam a ventilação, o uso de materiais inadequados compromete o desempenho térmico, como o vidro comum nas esquadrias, sem tratamento ou proteção adequada, que intensifica o ganho de calor por radiação direta, aumentando a carga térmica nos ambientes internos.

As paredes de blocos de concreto apresentam alta absorvividade térmica, enquanto a cobertura em laje e fibrocimento, sem ático, potencializa a transmissão de calor. O forro interno em PVC contribui para a condução térmica, e a platibanda impede a dissipação do calor por convecção, agravando o acúmulo de ar quente na cobertura.

Esses fatores foram confirmados pelas medições objetivas, que evidenciam o baixo desempenho energético da edificação. Durante as medições nas salas de aula, constatou-se ainda a ineficiência dos aparelhos de ar-condicionado, possivelmente relacionada à falta de manutenção associada ao baixo desempenho térmico da edificação. Observou-se diferença de até 12°C entre a temperatura registrada pelo termostato do ar-condicionado e a aferida pelos equipamentos de medição (Figura 24).

Figura 23 - Variação de temperatura mensurada na sala de aula A.



Fonte: Autor, 2025.

Os relatos dos usuários reforçam essa ineficácia: alunos da Sala A, localizada na fachada Sul, relataram desconforto térmico durante todo o dia, evidenciando a limitação dos materiais empregados na envoltória. Já os alunos da Sala B, voltada para a fachada Norte, apontaram maior desconforto no fim da tarde, em razão do

ganhos térmicos acumulados ao longo do dia e da incidência direta da radiação solar nesse período através das esquadrias em vidro sem proteção que permanecem fechadas devido ao uso contínuo do ar-condicionado. Tal constatação demonstra a ineficiência dos beirais como elemento de proteção solar na escola avaliada. Outro exemplo relacionado ao uso ineficiente de estratégias de sombreamento são as proteções das janelas na fachada oeste (Figura 25), que apresentam dimensões insuficientes para proteção proposta para as esquadrias de vidro no período da tarde quando a incidência solar está direcionada para a fachada oeste.

Figura 24 - Proteção solar das esquadrias na fachada oeste.



Fonte: Autor, 2025.

Em síntese, o estudo de caso direto evidencia que a adoção de estratégias bioclimáticas isoladas não garante, por si só, o conforto térmico adequado. Embora a edificação apresente elementos projetuais favoráveis, como ventilação cruzada, beirais e materiais com capacidade reflexiva, a aplicação inadequada ou limitada desses recursos compromete significativamente o desempenho térmico dos ambientes internos. Essa análise do estudo de caso direto evidencia os desafios enfrentados na aplicação prática das estratégias bioclimática em edificações escolares existentes. Para ampliar a compreensão sobre soluções eficientes de

conforto térmico passivo, o próximo item apresenta os estudos de caso indiretos, que exploram estratégias de projeto com aplicação eficiente.

3.2 ESTUDOS DE CASO INDIRETO

Os estudos de caso indiretos complementam a análise do caso direto ao apresentar projetos de escolas com estratégias eficientes de condicionamento passivo do conforto térmico em climas quentes e úmidos.

3.2.1 Estudo de caso indireto 01: DPS Kindergarten School – Bangalore, Índia

A DPS Kindergarten School, localizada na Índia e projetada pela Khosla Associates, oferece um exemplo notável de arquitetura que integra estratégias passivas para o conforto térmico, com foco em estratégias de sombreamento das aberturas e na otimização da ventilação natural (Figura 26).

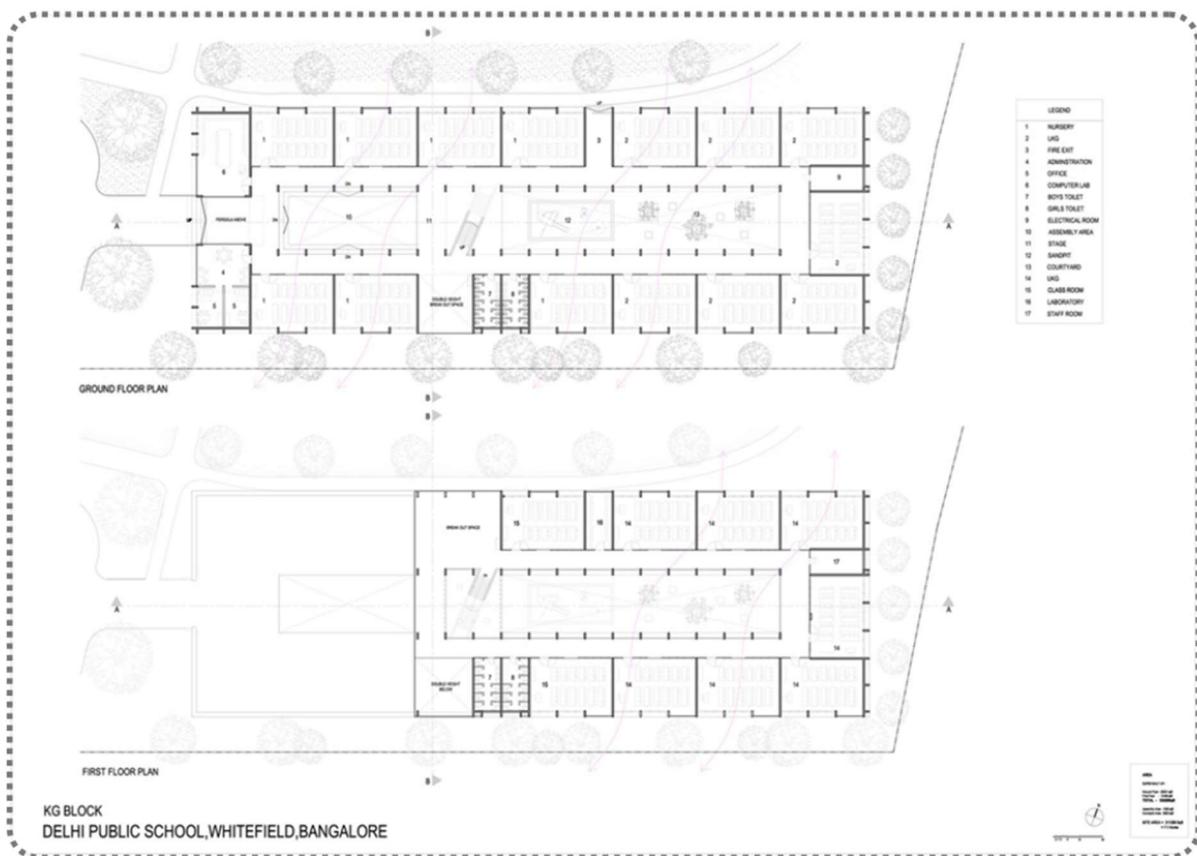
Figura 25 – Imagem da Fachada da Kindergarten School.



Fonte: ArchDaily, 2025.

A escola foi projetada para operar eficientemente em um clima desafiador, onde a mitigação do ganho de calor solar e a promoção da ventilação são essenciais para o conforto dos ocupantes. O projeto adota uma abordagem que prioriza o baixo consumo de energia, utilizando ao máximo os recursos naturais disponíveis (Figura 27).

Figura 26 - Planta Baixa dos Pavimentos Térreo e Superior da Kindergarten School.



Fonte: ArchDaily, 2025.

Dentre as estratégias utilizadas no projeto da escola encontra-se o uso de painéis de cobogó, elementos vazados que permitem o sombreamento dos ambientes e entrada permanente de ventilação. Esses elementos são eficientes para a redução da incidência solar direta na edificação, mantendo a percolação do vento.

São utilizados brises verticais e horizontais contínuos em toda a fachada, elementos que permitem o sombreamento das aberturas e o aumento da pressão que

auxilia no direcionamento da ventilação natural para os ambientes internos (Figura 28).

Figura 27 - Imagens do Pátio interno da Kindergarten School.



Fonte: ArchDaily, 2025.

3.2.2 Estudo de caso indireto 02: Escola Primária de Gando – Gando, Burkina Faso

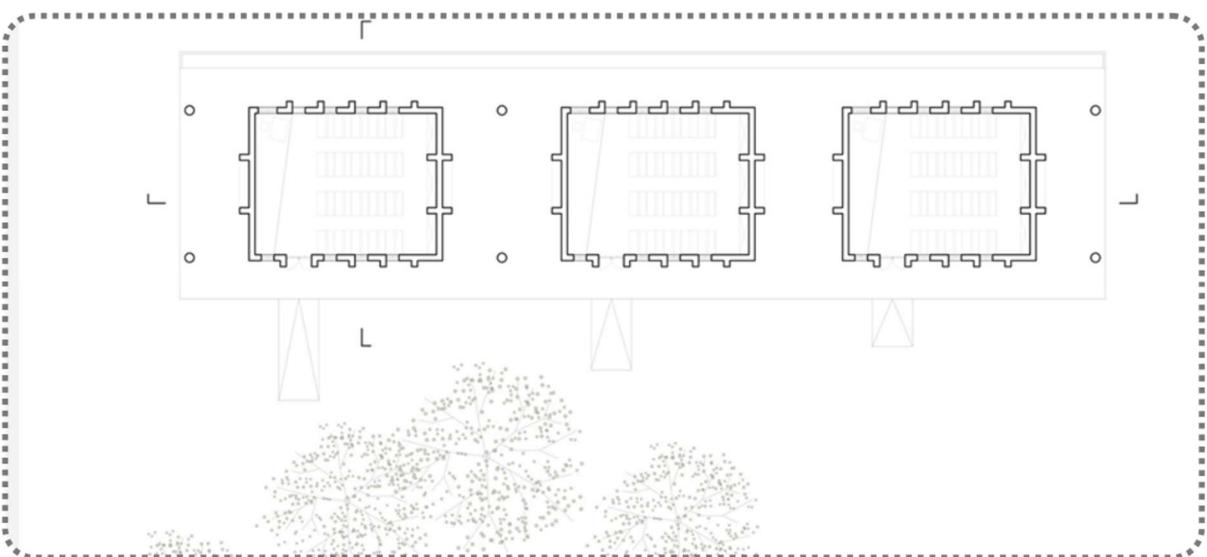
A Escola Primária de Gando, localizada em Burkina Faso e projetada por Diebédo Fracis Keré, destaca-se por sua abordagem vernacular, com o uso de técnicas e materiais regionais na concepção arquitetônica, utilizando estratégias passivas com ênfase na ventilação natural e capacidade térmica dos materiais para promover o conforto térmico. (Figuras 29 e 30).

Figura 28 - Imagem da fachada frontal da Escola Primária de Gando.



Fonte: ArchDaily, 2025.

Figura 29 - Planta Baixa da Escola Primária de Gando.



Fonte: ArchDaily, 2025.

O projeto apresenta como uma das soluções para garantir o conforto térmico uma estratégia de ventilação unida com a capacidade térmica dos materiais. Ao elevar

o telhado leve de zinco por treliças metálicas sobre laje de cobertura em argila perfurada é permitida a percolação do vento entre as camadas de cobertura e telhado, criando um ático ventilado que auxilia na dissipação do calor por convecção, minimizando a transmitância do calor incidente no telhado para o ambiente interno (Figura 31)

Figura 30 - Imagem da Fachada lateral da Escola Primária de Gando.



Fonte: ArchDaily, 2025.

O material da cobertura, por ser perfurado, também auxilia na entrada de ventilação para o ambiente, ao considerar a pressão exercida pelo telhado elevado, assim, o ar fresco é induzido a entrar no ambiente e o ar quente acumulado é liberado através das perfurações, permitindo um fluxo de ar constante que auxilia no resfriamento do ambiente interno.

A estratégia do ático ventilado é complementada pela ventilação cruzada. A orientação e posicionamento das aberturas, unidas ao efeito chaminé proporcionado

pelas perfurações na cobertura, otimizam a movimentação do ar promovendo sua renovação e dissipação do ar quente por convecção (Figura 32).

Figura 31 - Imagens da Fachada frontal da Escola Primária de Gando.



Fonte: ArchDaily, 2025.

A Escola Primária de Gando demonstra que soluções arquitetônicas simples baseadas em princípios da arquitetura bioclimática, aplicadas de forma eficiente, são capazes de otimizar o conforto térmico de forma passiva, sem o uso de condicionamento artificial.

3.3 SÍNTESE DOS ESTUDOS DE CASO

A análise da três edificações fornece uma base empírica consistente para compreender como as estratégias de conforto térmico passivo podem ser aplicadas em diferentes situações em edificações localizadas em clima quente e úmido.

Observa-se que, para garantir seu funcionamento e eficiência, é necessária a compreensão das diversas variáveis envolvidas e da interconexão entre múltiplas estratégias. Mesmo em condições climáticas semelhantes, as soluções não são sempre as mesmas, pois variam conforme a implantação da edificação em relação à incidência solar, aos ventos predominantes, à relação com o entorno, à morfologia arquitetônica e aos materiais utilizados na envoltória. Assim, a escolha das melhores estratégias deve ser realizada tanto na fase de projeto quanto em intervenções posteriores de adequação ao conforto térmico em edificações já construídas.

O estudo de caso direto (CEEP Amazonina) demonstrou que, embora o programa arquitetônico conte com estratégias bioclimáticas, como beirais, uso de materiais com propriedades de refletância na envoltória e esquadrias em fachadas opostas para ventilação cruzada, a ineficiência na aplicação e o mau aproveitamento desses elementos em função da orientação comprometeram o desempenho térmico geral. Os relatos dos usuários confirmam essa situação, ao apontarem que, mesmo com o uso de climatização artificial, o desconforto térmico persiste. Isso evidencia a importância da aplicação conjunta e eficaz das estratégias de condicionamento passivo para alcançar a eficiência térmica da edificação e, consequentemente, o conforto dos usuários.

Já os estudos indiretos (DPS Kindergarten School e Escola Primária de Gando) apresentam exemplos de sucesso na aplicação de estratégias passivas. A DPS Kindergarten School destaca-se pelo uso eficiente da ventilação e do sombreamento da envoltória e das aberturas, enquanto a Escola Primária de Gando prioriza a ventilação associada ao uso da inércia térmica dos materiais, com a adoção de ático ventilado que potencializa o desempenho da envoltória.

Em conjunto, os estudos de caso demonstram que a adoção isolada de estratégias bioclimáticas não garante o conforto térmico, tornando essencial considerar a integração das soluções e sua aplicação adequada, de acordo com as especificidades de cada edificação, evitando a aplicação ineficiente das estratégias.

04

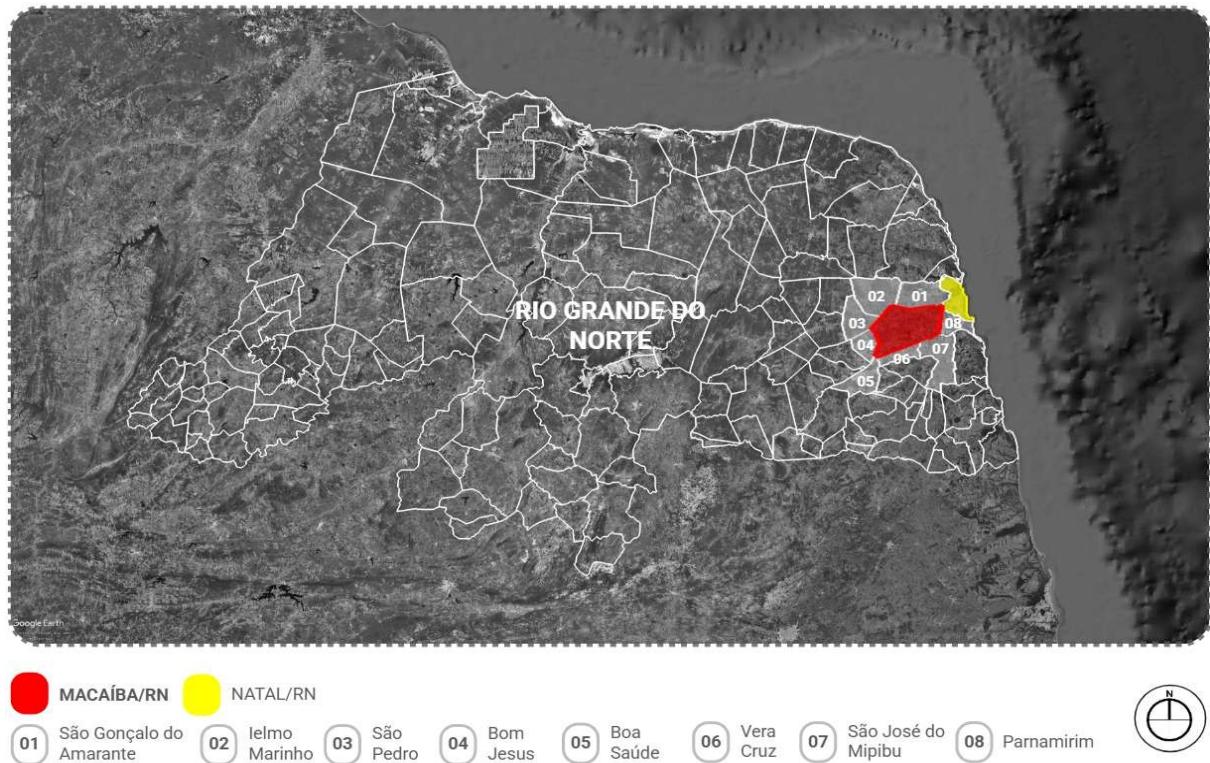
UNIVERSO E OBJETO DE ESTUDO

Após a discussão teórica e o referencial empírico sobre conforto térmico, desempenho de edificações e estratégias bioclimáticas, aprofunda-se agora na caracterização do universo e objeto de estudo. Esta seção destina-se a descrever as condicionantes climáticas e de localização da cidade de Macaíba/RN, além das condições físicas da edificação escolar objeto deste estudo a Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO UNIVERSO E OBJETO DE ESTUDO

A presente pesquisa tem como universo de estudo o município de Macaíba, localizado no estado do Rio Grande do Norte. Situado a aproximadamente 14 km de Natal/RN, o município integra a Região Metropolitana de Natal e se destaca por seu crescimento urbano. Seus limites são: São Gonçalo do Amarante e Ielmo Marinho (ao Norte); Vera Cruz e São José do Mipibu (ao Sul); Natal e Parnamirim (a Leste); e São Pedro e Bom Jesus (a Oeste) (Figura 33).

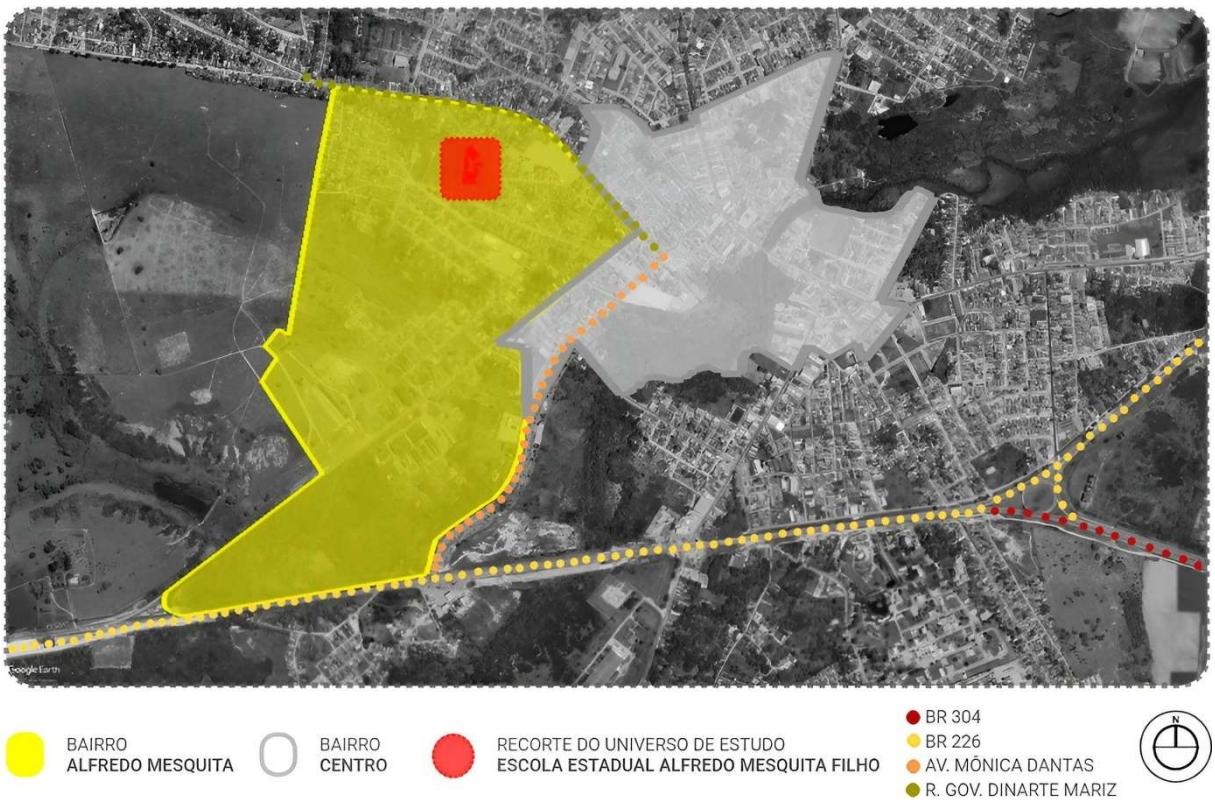
Figura 32 - Localização Universo de Estudo: Município de Macaíba/RN.



Fonte: Autor, 2025.

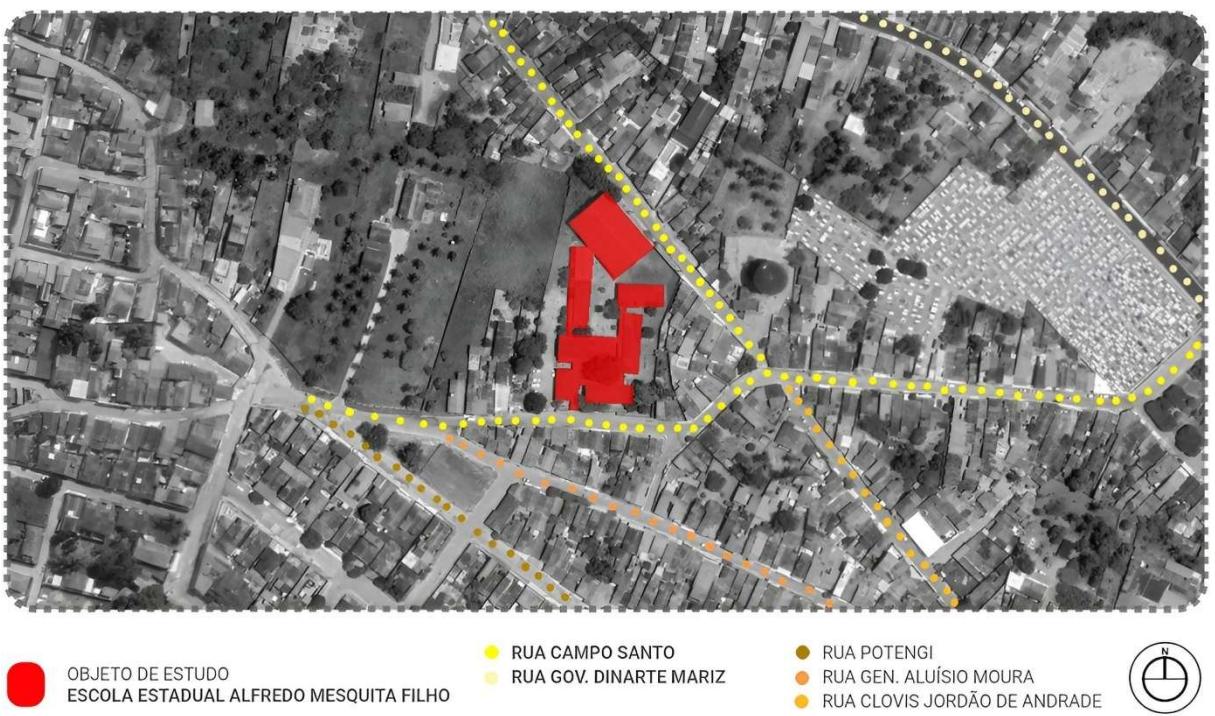
A pesquisa se concentra na zona urbana de Macaíba, de acordo com o macrozoneamento definido pelo Plano diretor Municipal (Lei Complementar nº 02/2021). Dentro dessa área, o bairro Alfredo Mesquita (Figura 34) foi selecionado como recorte para análise, por ser o local de implantação do objeto de estudo: a Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho, localizada entre as Ruas Campo Santo (Figura 35).

Figura 33 - Recorte do Universo de Estudo - Bairro Alfredo Mesquita.



Fonte: Autor, 2025.

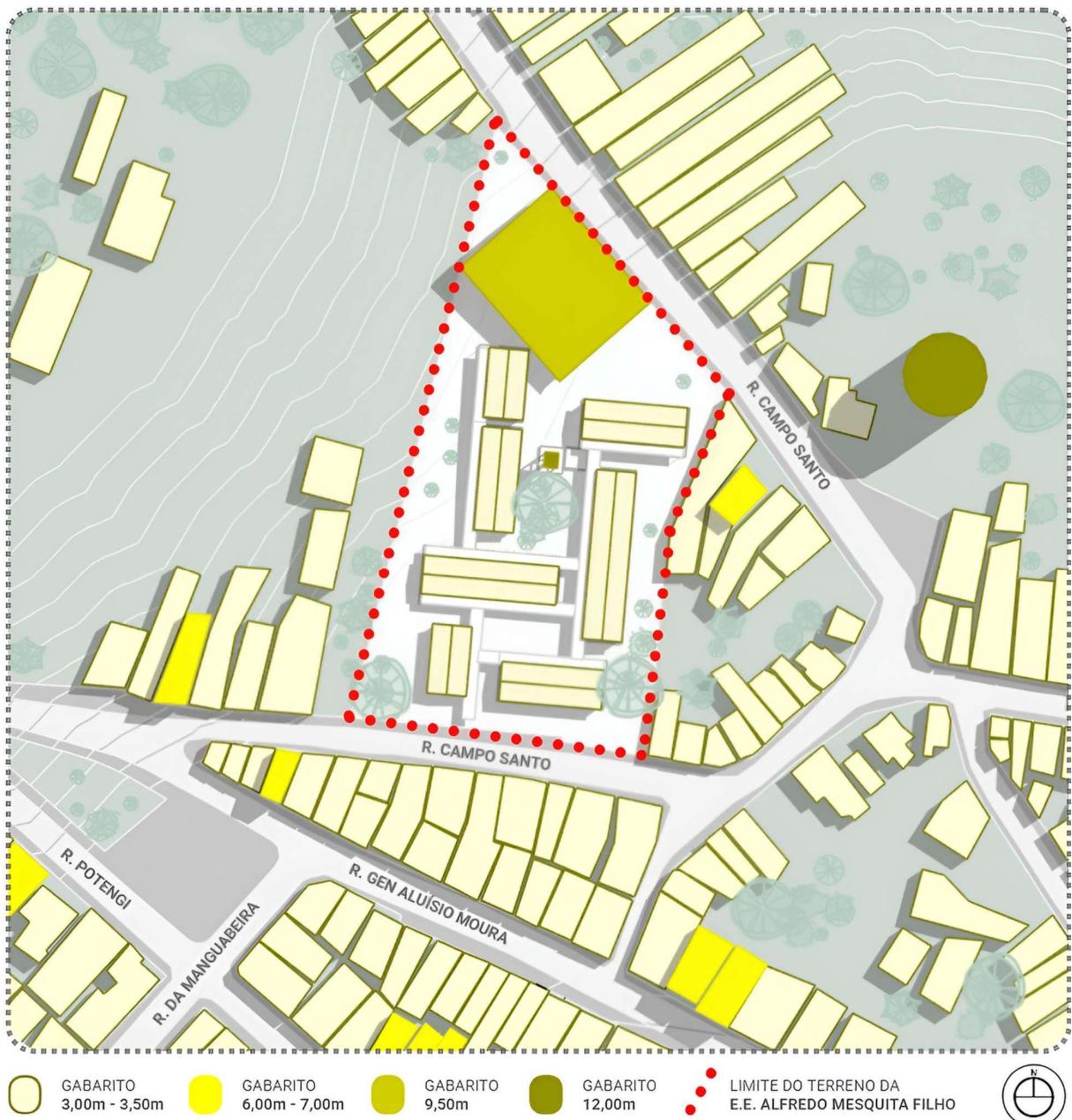
Figura 34 - Localização da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.



Fonte: Autor, 2025.

O terreno da escola localiza-se em uma cota topográfica elevada em relação ao centro da cidade. Essa característica, aliada à ocupação predominante de edificações residenciais térreas com gabarito entre 3,00m e 3,50m, garante uma boa percolação dos ventos para a edificação (Figura 39).

Figura 35 - Mapa de gabarito no entorno da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.



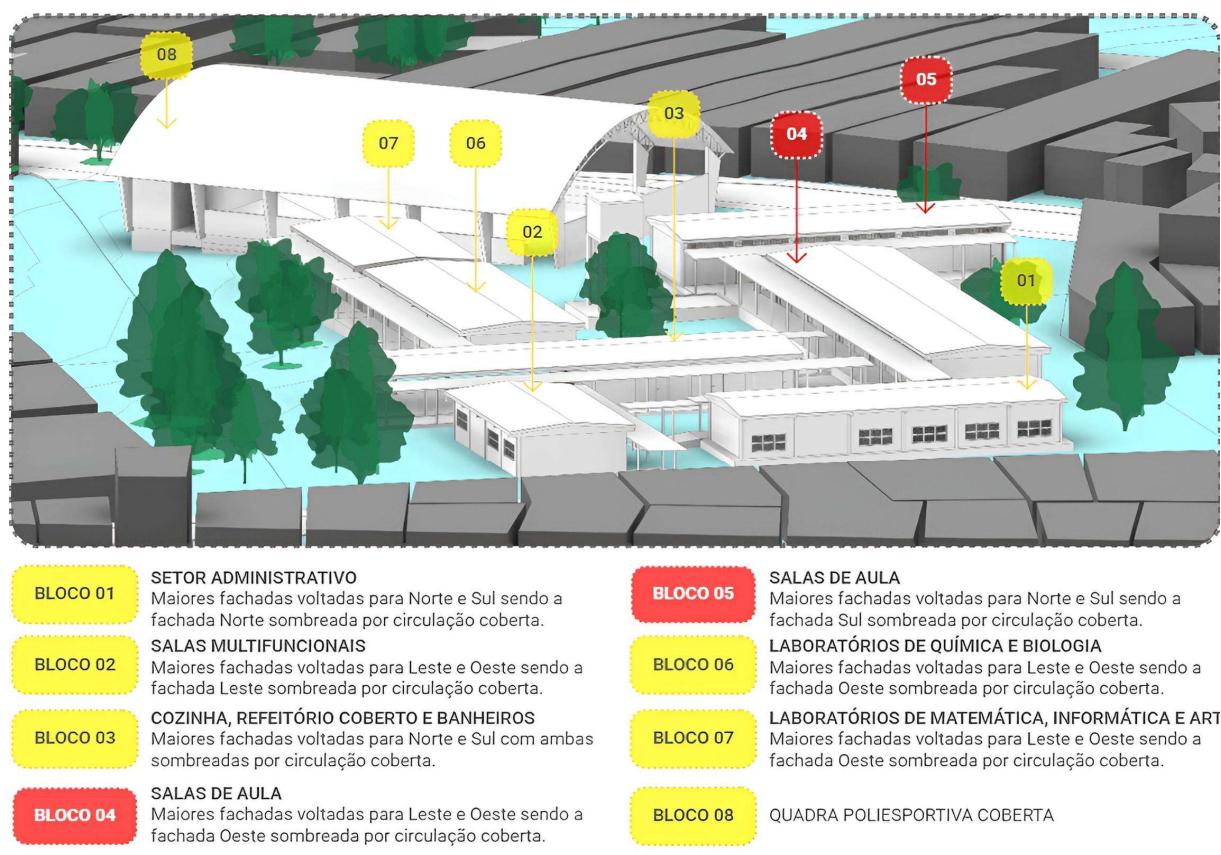
Fonte: Autor, 2025.

4.1.1 Características físicas do objeto

A Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho apresenta uma tipologia arquitetônica comum para escolas no Brasil, com implantação em blocos térreos isolados, conectados por circulações cobertas. Os espaçamentos e recuos entre os blocos auxiliam na circulação dos ventos.

O terreno da escola, com uma área total de 5.600,20m², possui uma área construída de 1.455,42m² e uma área permeável de 4.144,78m². Os blocos que compõem a edificação reposam sobre a topografia do terreno natural, que apresenta um declive de 2,50m em relação ao nível da testada frontal na Rua Campo Santo. A distribuição e orientação dos blocos condicionam o melhor aproveitamento da ventilação natural e a porcentagem de radiação em cada fachada, características que serão detalhadas no item 4.1.2 (Figura 40).

Figura 36 - Setorização dos Blocos da Escola Objeto de Estudo.



Fonte: Autor, 2025.

A edificação, fundada em 1978, possui estrutura em concreto pré-moldado, com paredes externas e divisórias internas em alvenaria de tijolos cerâmicos, as paredes têm revestimento externo em textura na cor bege e revestimento interno em gesso com pintura na cor branca.

A cobertura é da laje de concreto com inclinação de 15% e telhas cerâmicas coloniais apoiadas diretamente sobre ela. Os ambientes internos não possuem forro. As circulações entre os blocos são cobertas com telha de fibrocimento. Os pisos são de granilite claro de alta resistência, exceto no bloco do refeitório, que tem piso em ladrilho hidráulico. As Janelas nas salas de aula são do tipo basculante.

Figura 37 - Fotos Internas da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.



Fonte: Autor, 2025.

Nas áreas externas, o pátio central tem piso em placas de concreto áspero, e as áreas permeáveis consistem em solo natural com terra batida ou são cobertas por vegetação rasteira. A escola apresenta, ainda, vegetação pontual com árvores de copas médias e grandes que permitem o sombreamento de alguns pontos da edificação e a criação de espaços sombreados ao ar livre.

Figura 38 - Fachada Frontal da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho.



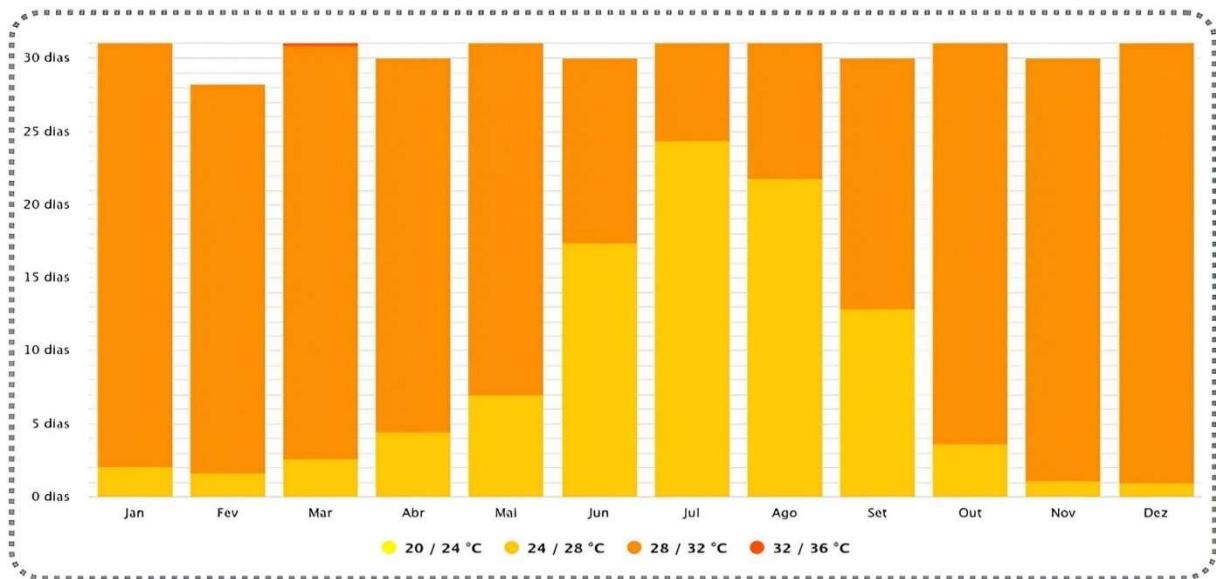
Fonte: Autor, 2025.

4.1.2 Caracterização climática do universo de estudo e influência no objeto

A compreensão do clima no universo de estudo é essencial para identificar os fatores que influenciam o desempenho térmico das edificações, condicionando a percepção de conforto dos usuários e orientando estratégias e intervenção arquitetônica mais eficientes.

O município de Macaíba situa-se na zona intertropical do hemisfério sul, apresentando dinâmica climática classificada como quente e úmida. De acordo com o Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente (IDEMA, 2013), o clima é do tipo tropical chuvoso, com temperaturas médias anuais entre 22°C e 30°C. O gráfico de variação das temperaturas máximas mensais (Figura 39) evidencia flutuações ao longo do ano: de novembro a março, registram-se maiores frequências de dias com temperaturas superiores a 30°C, enquanto de abril a outubro os valores tendem a ser mais amenos, com julho apresentando as menores médias, entre 24°C e 28°C.

Figura 39 - Temperaturas máximas registradas por mês em Macaíba/RN.

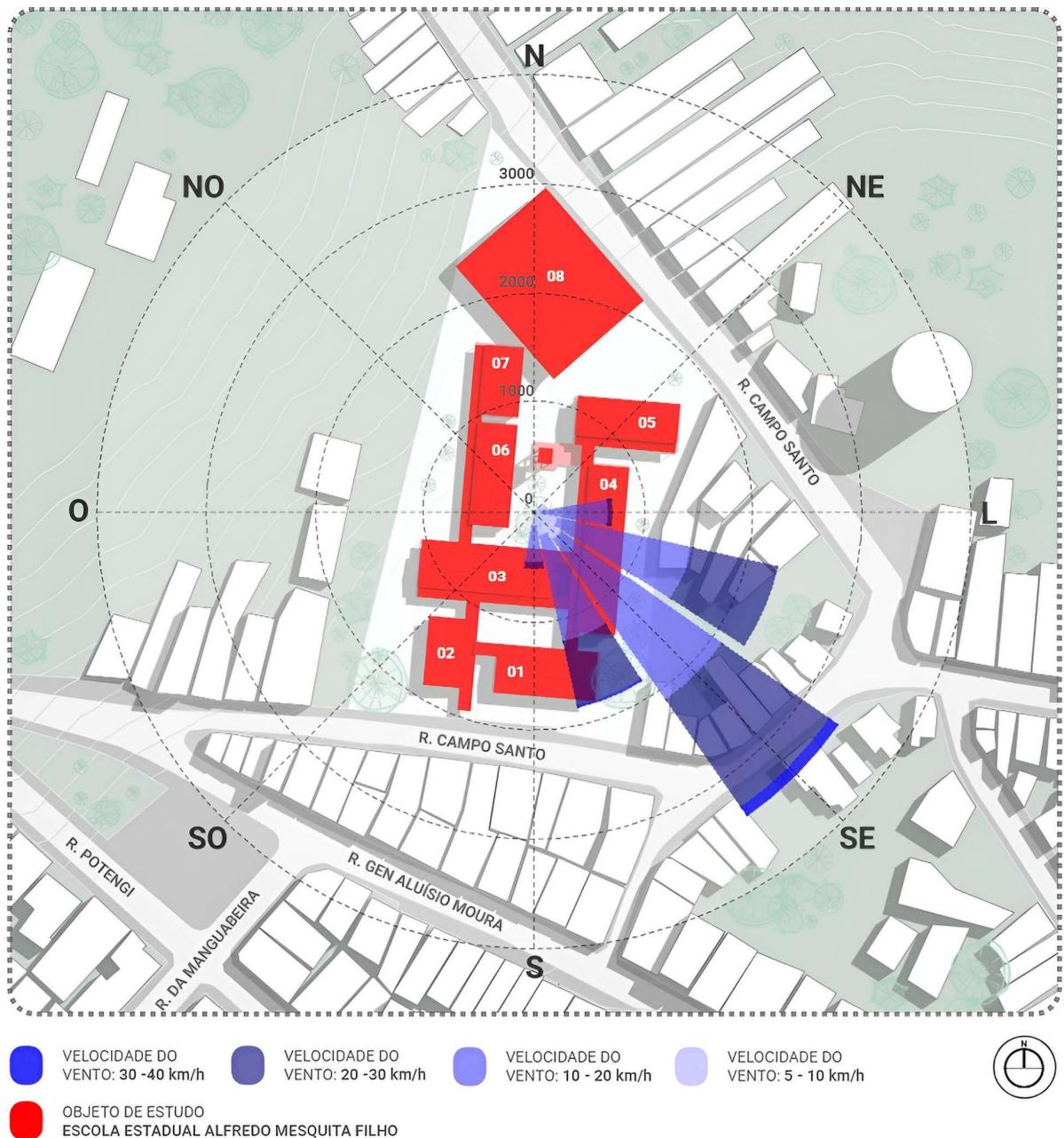


Fonte: Meteoblue, 2025.

O diagrama de direção dos ventos (Figura 40) demonstra a predominância dos ventos provenientes do quadrante Leste-Sul, com maior concentração e

velocidade na direção Sudeste. O período mais ventilado do ano ocorre entre junho e novembro, com pico de velocidade em setembro, atingindo média horária de 24,3 km/h. O período mais calmo estende-se de janeiro a maio, com menor média em abril.

Figura 40 - Diagrama da direção predominante da ventilação em Macaíba/RN.



Fonte: Autor, 2025. A partir do Meteoblue, 2025.

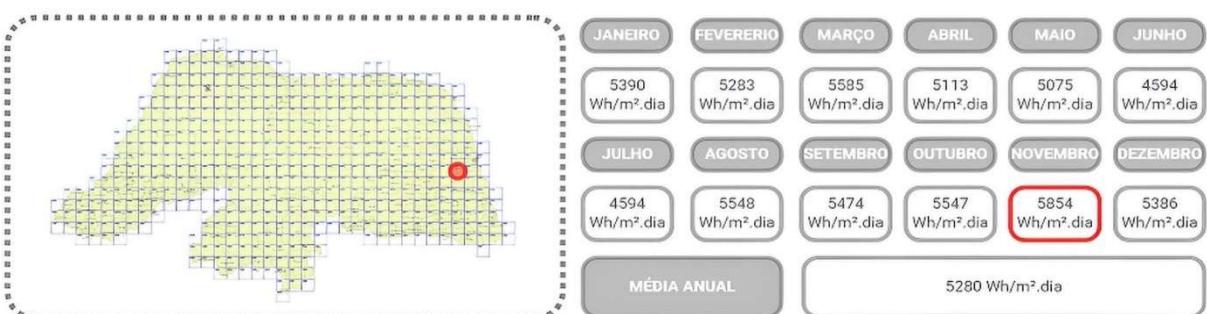
A análise da direção dos ventos sobre a orientação dos blocos da escola demonstra que os blocos com as melhores condições de ventilação natural são

aqueles com as maiores aberturas voltadas para as direções Leste (Blocos 02, 04, 06 e 07). O Bloco 01, embora não tenha suas maiores aberturas voltadas para Leste, apresenta sua maior fachada com aberturas para Sul, o que auxilia na captação dos ventos vindos da direção Sudeste. A pior condição é presenciada no bloco de salas de aula 05, que tem suas aberturas de ventilação voltadas para a direção Norte.

Além das temperaturas elevadas, a alta umidade relativa do ar, com média anual de 76% (IDEMA, 2013), constitui fator crítico. Em climas quentes, a evaporação do suor é o principal mecanismo de resfriamento corporal; contudo, a umidade elevada reduz a taxa de evaporação, dificultando a dissipação do calor e intensificando a sensação de desconforto térmico. A caracterização de Macaíba como zona bioclimática quente e úmida decorre de sua localização intertropical. A interação entre massas de ar quente e úmido, impulsionadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e pelos ventos alísios, gera alta instabilidade atmosférica, com formação frequente de nuvens e ocorrência regular de chuvas, definindo o padrão climático local.

A radiação solar é outro elemento determinante para o desempenho térmico das edificações, influenciando tanto a temperatura do ar quanto a temperatura radiante média. Dados do Atlas Solarimétrico do LABREN/INPE indicam que a irradiação direta normal apresenta média anual em torno de 5.280 Wh/m².dia, com picos que ultrapassam 5.800 Wh/m².dia entre outubro e novembro, meses de maior intensidade de radiação (Figura 41).

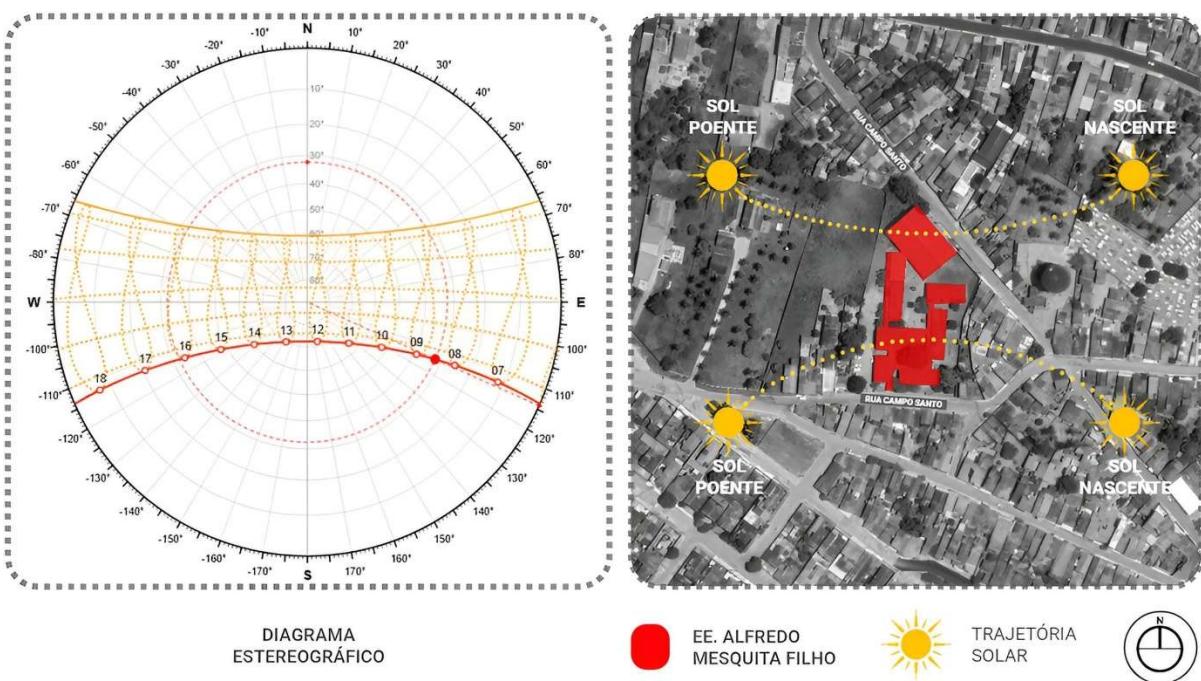
Figura 41 - Irradiação Direta Normal para o Estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: Autor, 2025. A partir do LABREN, 2025.

A carta solar para Macaíba (Figura 42) representa graficamente a trajetória aparente do Sol ao longo do ano, permitindo relacionar sua posição com os períodos de maior incidência. O diagrama Estereográfico evidencia o padrão em formato de analema – a curva em 8 que resulta da combinação da inclinação do eixo terrestre e da translação da Terra em torno do Sol -, no qual o Sol descreve percursos diários que variam entre posições mais ao norte, no inverno, e mais ao sul, no verão.

Figura 42 - Carta Solar (Diagrama Estereográfico) para o município de Macaíba/RN na data do solstício de inverno (21/12) às 8h30 / Trajetória solar sobre a edificação objeto de estudo.



Fonte: Sun-Path Chart – AJM, 2025 / Autor, 2025.

Essa variação sazonal explica a alternância da insolação sobre as diferentes fachadas: as fachadas norte recebem radiação direta entre os meses de abril à agosto, enquanto as fachadas sul são mais expostas entre outubro e fevereiro. Nos dias de março e de setembro, a radiação solar incide em ponto mais alto, atingindo principalmente às fachadas Leste e Oeste.

4.2 DEFINIÇÃO DAS SALAS DE AULA PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Considerando o exposto e a definição do universo e do objeto de estudo, procede-se à seleção dos ambientes nos quais as condições de conforto térmico foram avaliadas. A escolha concentrou-se nos blocos destinados às salas de aula, tendo em vista que são os espaços onde alunos e professores permanecem por maior parte do tempo letivo.

A escola é composta por oito blocos, sendo os blocos 04 e 05 aqueles ocupados pelas salas de aula regulares. Assim, estes foram definidos como o conjunto prioritário para a análise (Figura 43).

Figura 43 - Localização das salas de aula objeto de análise.



Fonte: Autor, 2025.

Em 24 de abril de 2025, realizou-se uma visita técnica à escola para dialogar com a coordenação pedagógica e com os docentes. Durante a visita, buscou-se identificar, a partir da percepção dos usuários, quais salas apresentavam condições mais críticas de conforto térmico ao longo da rotina escolar.

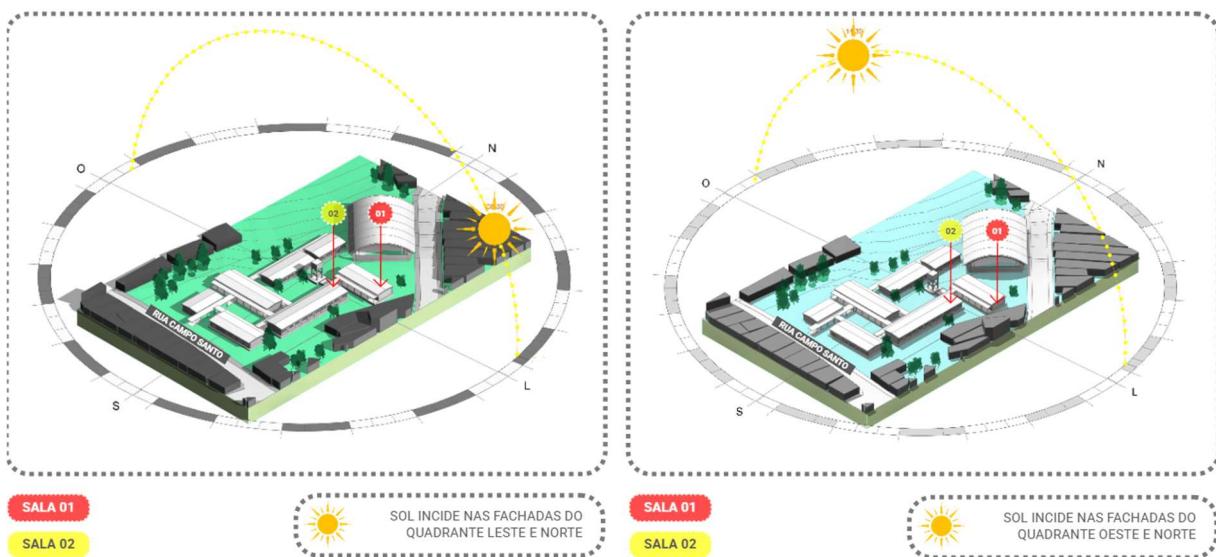
Além desse levantamento, soma-se ao processo a familiaridade prévia do pesquisador com a instituição, uma vez que parte de sua trajetória escolar ocorreu no local. Essa vivência contribuiu para reconhecer ambientes que historicamente apresentavam desconforto térmico, reforçando a pertinência da escolha realizada. Destaca-se, contudo, que essa informação opera apenas como elemento de contextualização, não substituindo os procedimentos adotados na seleção das salas.

Com base nesses elementos, foram definidas duas salas representativas de situações recorrentes de desconforto térmico – uma no bloco 04 e outra no bloco 05 – que compõem o conjunto avaliado neste estudo (Figura 43).

Para auxiliar na análise dos dados, e considerando a data de avaliação do conforto térmico (apresentada na Seção 5), foi feita uma simulação da trajetória solar para os turnos da manhã e da tarde do dia 4 de setembro.

As simulações mostram que a sala 01, localizada no bloco 04, tem suas fachadas Norte, Leste e Oeste expostas à radiação, recebendo radiação direta nas faces Leste pela manhã e Oeste pela tarde. Já a sala 02, no bloco 05, tem as fachadas Norte, Leste e Sul expostas, recebendo o sol da manhã na face Leste.

Figura 44 - Trajetória solar para o dia 04 de setembro de 2025.



Fonte: Autor, 2025.

Dias antes do levantamento, as coberturas da circulação entre blocos da escola foram demolidas devido à fragilidade da estrutura antiga. Esse fato pode proporcionar um maior ganho de carga térmica por radiação nas fachadas expostas.

Figura 45 - Imagens da demolição da cobertura das circulações da escola.



Fonte: Autor, 2025.

05

AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

Esta seção descreve os procedimentos metodológicos adotados para avaliar o conforto térmico nas salas de aula da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho, localizada em Macaíba/RN, uma área de clima quente e úmido. O objetivo central foi verificar, por meio de medições ambientais e questionários aplicados aos usuários, se as condições internas atendem aos limites de aceitabilidade definidos pelo modelo adaptativo de conforto térmico, conforme a ABNT NBR 16401-2:2024.

Para isso, foram combinadas técnicas de coleta de dados objetivos (variáveis ambientais) e subjetivos (respostas de sensação, preferência e percepção térmica), o que permitiu uma análise integrada das características físicas do ambiente e da percepção dos ocupantes.

5.1 METODOLOGIA

A avaliação do conforto térmico foi conduzida a partir da combinação de duas abordagens complementares: o modelo adaptativo de conforto térmico, que utiliza variáveis ambientais medidas no interior e exterior das salas de aula, e questionários semiestruturados aplicados aos usuários para identificar suas respostas de sensação, preferência e percepção térmica. Todo o processo metodológico – incluindo a definição das variáveis ambientais, os procedimentos de medição e a estruturação dos instrumentos subjetivos – foi orientado pela ABNT NBR 16401-2:2024 – Sistemas de ar-condicionado – Instalação – Parte 2: Conforto térmico, adotada como principal referência normativa para a condução das avaliações objetiva e subjetiva.

No caso do modelo adaptativo, foram utilizados equipamentos específicos para a medição das variáveis ambientais, incluindo a temperatura do ar interno (T_a), a temperatura radiante média (T_r) e a velocidade do ar (V_{ar}). Além disso, uma câmera termográfica e um termômetro infravermelho portátil foram empregados para obter dados complementares sobre as temperaturas superficiais da envoltória da edificação (paredes), embora tais dados não sejam diretamente necessários para o cálculo da temperatura operativa (T_o). A temperatura operativa é a variável obtida por meio da metodologia adaptativa para determinar os limites superior e inferior de aceitabilidade do conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados.

A utilização conjunta dessas metodologias possibilitou uma análise mais abrangente, integrando parâmetros objetivos do ambiente e informações subjetivas relacionadas à percepção dos ocupantes. Assim, buscou-se verificar se os ambientes avaliados atendiam aos limites de aceitabilidade definidos pelo modelo adaptativo,

considerando a temperatura externa média dos sete dias anteriores à medição e a capacidade de aclimatação dos usuários em condições de ventilação natural.

5.1.1 Estratégia temporal de coleta de dados.

A estratégia temporal de coleta de dados foi definida considerando estudos precedentes, o calendário acadêmico e as diretrizes da ABNT NBR 16401-2:2024. A pesquisa ocorreu em 04 de setembro de 2025, durante o segundo semestre letivo, na escola objeto de estudo.

Figura 46 - Equipe de medição na Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho (Macaíba/RN), durante a coleta de dados ambientais no dia 04/09/2025.



Fonte: Acervo próprio, 2025.

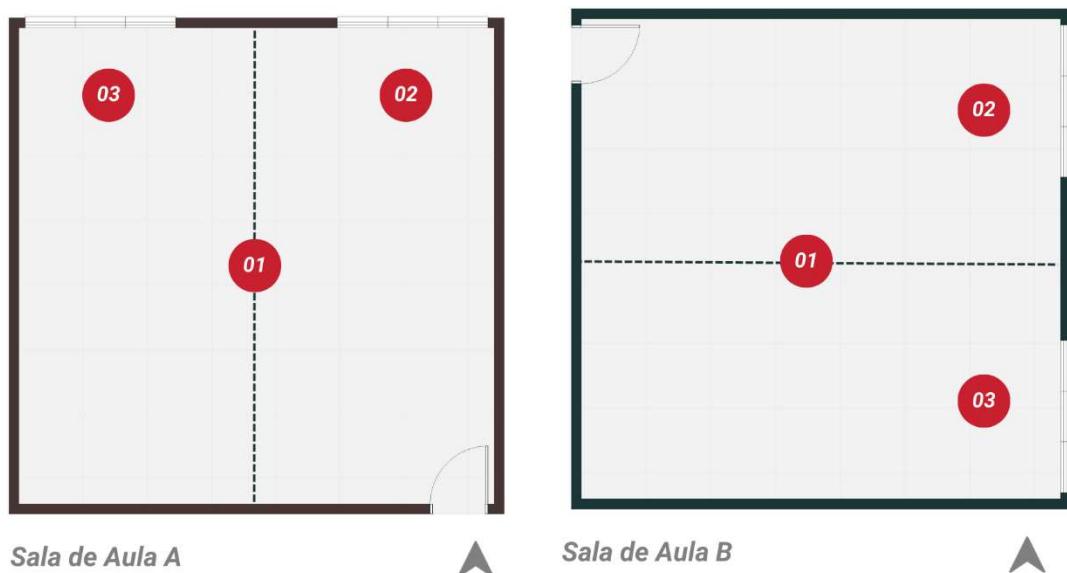
Após a definição da data, os horários de medição foram estabelecidos para garantir que os usuários estivessem no ambiente por pelo menos uma hora antes da avaliação. Esse tempo de aclimatação foi essencial para reduzir a influência de fatores metabólicos como alimentação ou movimentação prévias e para evitar distorções nas respostas subjetivas considerando que o ambiente externo pode ser sentido como mais confortável que o interno.

Foram realizadas quatro medições: duas no turno da manhã (10h15-10h50 e 10h55-11h30) e duas no turno da tarde (14h-14h35 e 14h40-15h15). Cada sessão teve duração aproximada de 35 minutos por sala, o que incluiu os tempos necessários para aclimatação dos usuários e equipamentos, medições instrumentais e aplicação dos questionários.

5.1.2 Medição das variáveis ambientais

As medições ambientais foram conduzidas em duas salas de aula da escola. Seguindo as diretrizes da ABNT NBR 16401-2:2024, três pontos de medição foram definidos em cada sala sendo: **Ponto 01** – Eixo Geométrico da Sala de aula, com medições nas alturas de 0,1m, 0,6m e 1,10m, onde foram aferidas as variáveis de temperatura do ar, temperatura radiante média e velocidade do ar; Pontos 02 e 03 - 1,00m do eixo de abertura de ventilação, com medições nas alturas de 0,1m, 0,6m e 1,10m, sendo aferida a temperatura do ar.

Figura 47 – Planta baixa esquemática das salas de aula 01 e 02 com a indicação dos três pontos de medição.



Fonte: Autor, 2025.

Para aferição da temperatura do ar e da velocidade do ar, foram consideradas três alturas representativas do corpo humano em posição sentada: tornozelo (0,10m), cintura (0,60m) e pescoço (1,10m) (Figura 48).

As temperaturas do ar foram mensuradas nas três alturas nos três pontos definidos, a velocidade do ar foi mensurada no ponto central nas três alturas e a temperatura de globo (temperatura radiante média) no ponto central na altura de 0,60m. Todos os pontos e alturas foram identificados e selecionados considerando as diretrizes previstas na ABNT NBR 16401-2:2024.

Figura 48 - Esquema das alturas e pontos de medição das variáveis ambientais internas.



Fonte: Autor, 2025.

Os instrumentos necessários às medições foram gentilmente disponibilizados pelo Centro Universitário do Rio Grande do Norte (UNI-RN) e pelo Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LABCON/UFRN), possibilitando a execução das etapas objetivas da pesquisa.

Figura 49 – Instrumentos de medição.



Fonte: Acervo próprio, 2025.

Para a medição da temperatura do ar interno foram utilizados Termo-Higro-Sonômetro-Luxímetro Digital modelo THDL-400 (Instrutherm) nos três pontos e nas três alturas de cada sala de aula avaliada, com tempo de medição de 4min em cada ponto (Figura 50).

Figura 50 - Termo-Higro-Sonômetro-Luxímetro Digital

INSTRUMENTAÇÃO

Temperatura do ar (°C)



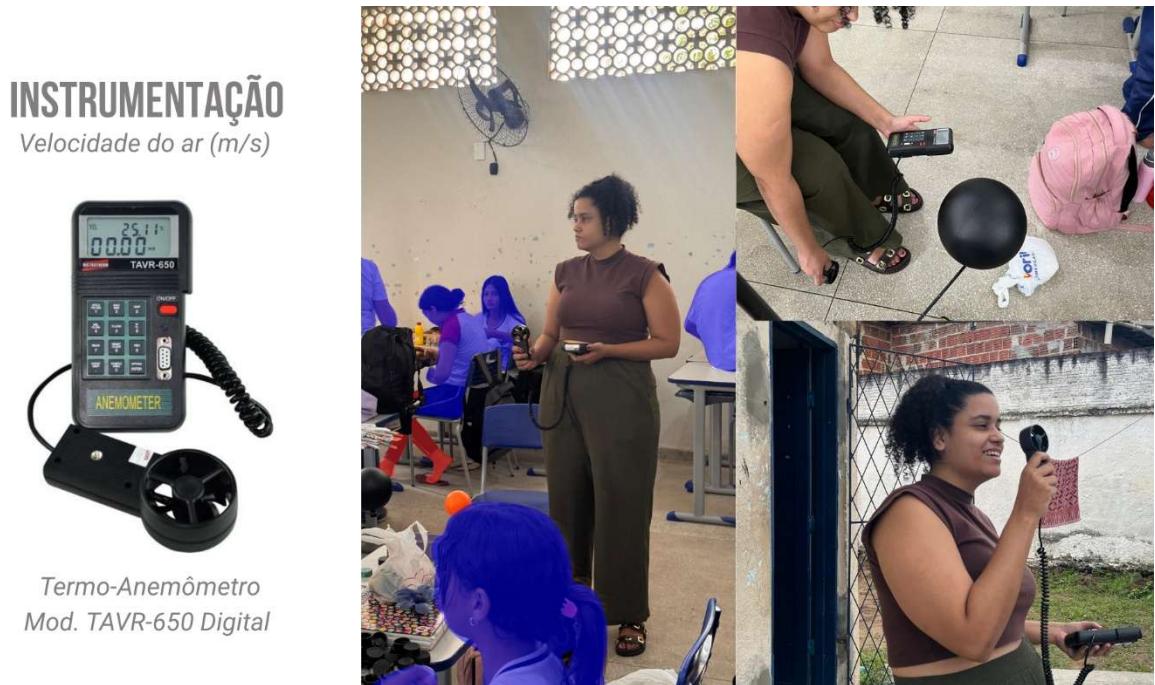
Termo-Higro-Sonômetro-Luxímetro Digital Portátil
THDL-400



Fonte: Acervo próprio, 2025.

Para a medição da velocidade do ar foi utilizado um Termo-Anemômetro Digital modelo TAVR-650 (Instrutherm), utilizado no ponto central de cada sala de aula avaliada nas três alturas indicadas, com tempo de medição de 4min em cada ponto (Figura 51).

Figura 51 - Termo-Anemômetro Digital.



Fonte: Acervo próprio, 2025.

Para a medição da temperatura média radiante foi utilizado o Datalogger HT-810 que foi instalado em um globo negro de 15cm apoiado sobre suporte com haste metálica a 0,60cm do nível do piso (Figura 52).

A acuracidade definida para a medição foi de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, com faixa de medição entre 10°C e 40°C . O equipamento foi previamente programado para coletar dados a cada 1min durante 30 minutos de medição em cada ponto avaliado. Os equipamentos foram transportados dentro de uma caixa térmica em isopor para evitar o ganho térmico nas superfícies, evitando inconsistência de temperatura durante o período avaliado, sendo retirados para implantação nos pontos apenas no momento da avaliação.

Figura 52 - Termômetro de Globo.

INSTRUMENTAÇÃO

Temperatura Radiante

Média ($^{\circ}\text{C}$)



Datalogger Digital
Termômetro Temperatura

Ht-810



Fonte: Acervo próprio, 2025.

Além das medições internas, foi aferida a temperatura e umidade do ar externo com o Termo-higrômetro Digital com Datalogger HOBO Onset UX100-003 (Figura 60), com acuracidade entre $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ e faixa de medição de 10°C a 40°C .

Figura 53 - Equipamento para medição de temperatura e umidade externa.

INSTRUMENTAÇÃO

Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e

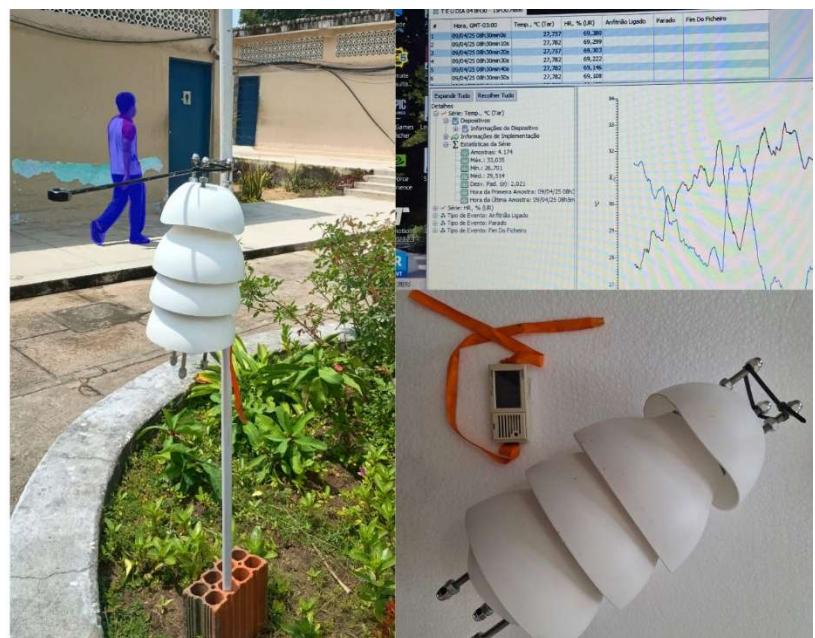
Umidade do ar (%)



Termo-higrômetro Digital

com Datalogger HOBO

Onset UX100-003



Fonte: Acervo próprio, 2025.

O equipamento foi previamente configurado para iniciar a medição em 30min após o start no software de leitura dos dados, realizando medições de 10 em 10 min durante o período de 8h30 da manhã até às 15h30 da tarde do dia 04/09/2025, data de medição. O equipamento foi posicionado no pátio central da escola dentro de equipamento protetor contra as ações do vento, chuva e radiação direta, instalado a uma altura de 1,10cm do piso (Figura 53).

Foram realizadas medições de temperatura superficial da envoltória e testagem dos efeitos práticos da aplicação de sombreamento e material isolante na face externa da envoltória para redução da carga térmica. Para isso, utilizou-se uma câmera termográfica Flir C2 e um termômetro infravermelho modelo TI-430 Instrutherm (Figura 54).

Figura 54 - Sensores para medição da temperatura superficial.



Fonte: Autor, 2025.

5.1.3 Coleta de dados subjetivos

Paralelamente às medições ambientais, foram aplicados questionários semiestruturados aos ocupantes das salas de aula, com o objetivo de registrar as respostas de sensação térmica, preferência térmica e percepção térmica durante os

períodos avaliados. Os questionários foram elaborados com base nas diretrizes da ABNT NBR 16401-2:2024 e em estudos prévios, contendo cinco questões objetivas sobre conforto térmico, além de campos para registro de idade, altura, peso e sexo, permitindo correlacionar características físicas às respostas individuais (Figura 55).

Os instrumentos de avaliação foram planejados para aplicação em dois horários distintos em cada turno (manhã e tarde), de modo a captar variações de percepção térmica ao longo do período. No entanto, por questões logísticas ocorridas no dia da avaliação, apenas um dos horários previstos pôde ser aplicado no turno da tarde, configurando uma limitação do estudo.

Não foram incluídos campos referentes à atividade metabólica e à vestimenta, uma vez que todos os usuários se encontravam em atividade sedentária (aproximadamente 1,2 met) e utilizando o fardamento escolar padrão, equivalente a um isolamento térmico de 0,49 clo. As respostas foram coletadas em meio físico devido à restrição do uso de aparelhos celulares na escola. Cada participante também indicou sua posição na planta da sala, permitindo analisar possíveis variações de percepção térmica relacionadas à localização.

Além dos questionários, foram utilizadas fichas de medição preenchidas pelo pesquisador, destinadas ao registro das condições ambientais no momento da coleta (Figuras 56 e 57).

Figura 55 - Questionário Aplicado aos usuários na sala 01 .

PESQUISA: AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA DE EDIFÍCIO ESCOLAR NO MUNICÍPIO DE MACAÍBA/RN					
FICHA DE AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO					
ESCOLA:	Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho	DATA:		HORA:	
IDENTIFICAÇÃO DA SALA:	01	TURMA:			
DADOS DO USUÁRIO			NA FIGURA ABAIXO, MARQUE COM UM "X" O LUGAR QUE MELHOR REPRESENTA SUA LOCALIZAÇÃO ATUAL NA SALA DE AULA		
NOME:					
IDADE:	<input type="text"/>	ALTURA:	<input type="text"/>	PESO:	<input type="text"/>
SEXO:	<input type="radio"/> MASC.	<input type="radio"/> FEM.	<input type="radio"/> OUTRO		
<p>Este questionário tem como objetivo coletar dados sobre a sensação, percepção e preferência térmica dos usuários em salas de aula da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho. As respostas obtidas fornecerão base de dados para pesquisa científica que busca compreender o conforto térmico nos ambientes avaliados.</p> <p><i>Todas as informações que você fornecer são anônimas e confidenciais. Seus dados serão usados apenas para a análise da pesquisa.</i></p>			 <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 150px;"></div>		
QUESTIONÁRIO					
TURNO 01:	HORA:	TURNO 01:	HORA:		
1 - QUAL A SUA SENSAÇÃO TÉRMICA NESTE MOMENTO?	4 - COMO VOCÊ SENTE A VENTILAÇÃO NESTE MOMENTO?	1 - QUAL A SUA SENSAÇÃO TÉRMICA NESTE MOMENTO?	4 - COMO VOCÊ SENTE A VENTILAÇÃO NESTE MOMENTO?		
<input checked="" type="checkbox"/> Com muito Calor <input checked="" type="checkbox"/> Com Calor <input checked="" type="checkbox"/> Levemente com Calor <input checked="" type="checkbox"/> Confortável <input checked="" type="checkbox"/> Levemente com Frio <input checked="" type="checkbox"/> Com Frio <input checked="" type="checkbox"/> Com muito Frio	<input type="checkbox"/> Pouca Ventilação <input type="checkbox"/> Ventilação <input type="checkbox"/> Suficiente <input type="checkbox"/> Muita Ventilação	<input checked="" type="checkbox"/> Com muito Calor <input checked="" type="checkbox"/> Com Calor <input checked="" type="checkbox"/> Levemente com Calor <input checked="" type="checkbox"/> Confortável <input checked="" type="checkbox"/> Levemente com Frio <input checked="" type="checkbox"/> Com Frio <input checked="" type="checkbox"/> Com muito Frio	<input type="checkbox"/> Pouca Ventilação <input type="checkbox"/> Ventilação <input type="checkbox"/> Suficiente <input type="checkbox"/> Muita Ventilação		
2 - COMO VOCÊ PREFERIA ESTAR NESTE MOMENTO?	5 - QUAL A SUA PREFERÊNCIA PARA A VENTILAÇÃO NESTE MOMENTO?	2 - COMO VOCÊ PREFERIA ESTAR NESTE MOMENTO?	5 - QUAL A SUA PREFERÊNCIA PARA A VENTILAÇÃO NESTE MOMENTO?		
<input checked="" type="checkbox"/> Mais Aquecido <input checked="" type="checkbox"/> Não Mudar <input checked="" type="checkbox"/> Mais Frio	<input type="checkbox"/> Maior Ventilação <input type="checkbox"/> Não Mudar <input type="checkbox"/> Menor Ventilação	<input checked="" type="checkbox"/> Mais Aquecido <input checked="" type="checkbox"/> Não Mudar <input checked="" type="checkbox"/> Mais Frio	<input type="checkbox"/> Maior Ventilação <input type="checkbox"/> Não Mudar <input type="checkbox"/> Menor Ventilação		
3 - COMO VOCÊ AVALIA O CONFORTO TÉRMICO DESTA SALA DE AULA?		3 - COMO VOCÊ AVALIA O CONFORTO TÉRMICO DESTA SALA DE AULA?			
<input type="checkbox"/> Inaceitável <input type="checkbox"/> Neutro <input type="checkbox"/> Aceitável		<input type="checkbox"/> Inaceitável <input type="checkbox"/> Neutro <input type="checkbox"/> Aceitável			

Fonte: Autor, 2025.

Figura 56 - Ficha de Medição 01, utilizada pelo pesquisador na sala 01.

PESQUISA: AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA DE EDIFÍCIO ESCOLAR NO MUNICÍPIO DE MACAÍBA/RN		
FICHA DE MEDAÇÃO 01		
DADOS GERAIS	ESCOLA: <input type="text" value="Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho"/>	DATA: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
	IDENTIFICAÇÃO DA SALA: <input type="text" value="01"/>	TURMA: <input type="text"/> Nº OCUPANTES NA SALA: <input type="text"/>
NOME DO PESQUISADOR		
INDICAÇÃO DOS PONTOS DE MEDAÇÃO		
<ul style="list-style-type: none"> Em grafite, elabore um croqui apresentando o layout atual da sala de aula referente à posição de cada usuário (professor e aluno). Os pontos (01, 02 e 03) indicam o posicionamento dos equipamentos para as medições das variáveis ambientais. Com o auxílio de uma trena, posicione o ponto 01 no eixo geométrico da sala de aula, os pontos 02 e 03 devem estar à 1,0m de distância do eixo de cada janela. Os pontos A01, A02, A03 e A04 indicam a legenda das paredes para medição das temperaturas superficiais. 		
 <p>OS PONTOS DE MEDAÇÃO FORAM DEFINIDOS A PARTIR DAS DIRETRIZES DA ABNT NBR 16401-2:2024</p>		

Fonte: Autor, 2025.

Figura 57 - Ficha de Medição 02, utilizada pelo pesquisador na sala 01.

PESQUISA: AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA DE EDIFÍCIO ESCOLAR NO MUNICÍPIO DE MACAÍBA/RN						
FICHA DE MEDAÇÃO 02						
DADOS GERAIS	ESCOLA: <input type="text" value="Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho"/>	DATA: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>				
	IDENTIFICAÇÃO DA SALA: <input type="text" value="01"/>	TURMA: <input type="text"/>	Nº OCUPANTES NA SALA: <input type="text"/>			
NOME DO PESQUISADOR _____						
TURNO E NÚMERO DA MEDAÇÃO: _____			HORÁRIO DE INÍCIO DA MEDAÇÃO: _____			
CONDIÇÕES DE CÉU		LIMPO <input type="checkbox"/>	PARCIALMENTE ENCOBERTO <input type="checkbox"/>	ENCOBERTO <input type="checkbox"/>		
MEDICAÇÕES - FATORES AMBIENTAIS						
Local de medição	Temporalidade	Altura de medição	Temperatura do ar	Umidade relativa do ar	Velocidade do ar	Temperatura média radiante
PONTO 01	HORA E MIN	NÍVEL	Tar (°C)	UR (%)	Var (m/s)	Tr (°C)
		0,10M				
		0,60M				
		1,10M				
PONTO 02		0,10M				
		0,60M				
		1,10M				
PONTO 03		0,10M				
		0,60M				
		1,10M				
MEDICAÇÕES DE TEMPERATURA SUPERFICIAL - TERMÔMETRO INFRAVERMELHO						
SUPERFÍCIE	TEMP.	SUPERFÍCIE	TEMP.	SUPERFÍCIE	TEMP.	
A01	<input type="text"/> I <input type="text"/> E	A01	<input type="text"/> I <input type="text"/> E	TETO	<input type="text"/>	A03
A01	<input type="text"/> I <input type="text"/> E	A01	<input type="text"/> I <input type="text"/> E	PISO	<input type="text"/>	A02
<i>I - Face Interna da parede / E - Face Externa da parede</i>						
EXISTE ALGUM EQUIPAMENTO DE CONDICIONAMENTO TÉRMICO OU DE VENTILAÇÃO EM OPERAÇÃO NO AMBIENTE AVALIADO?						<input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO

Fonte: Autor, 2025.

5.1.4 Limitações e imprecisões da pesquisa

No dia da coleta, a escola encontrava-se em situação atípica, com aproximadamente 37% da ocupação habitual nas salas de aula avaliadas. Eram previstos 30 alunos na Sala 01 e 37 na Sala 02, porém estavam presentes, no momento da medição, apenas 14 na Sala 01 e 11 na Sala 02. Essa condição pode ter comprometido a representatividade dos resultados, uma vez que a densidade ocupacional influencia diretamente as condições térmicas internas (Figura 58).

Figura 58 - Alunos presentes nas salas de aula avaliadas.



Fonte: Acervo próprio, 2025.

Observou-se também que os ventiladores instalados nas salas estavam desligados. Embora o estudo priorize a análise de estratégias passivas, a presença desses equipamentos pode influenciar a percepção térmica dos usuários: o ventilador desligado atua como um elemento visual que reforça a sensação de calor, induzindo ocupantes a acreditar que o ambiente está mais quente devido à ausência de ventilação mecânica. Esse fator pode ter afetado parte das respostas subjetivas.

Outra limitação identificada refere-se às janelas das salas avaliadas. Algumas folhas encontravam-se quebradas, impedindo a abertura total e restringindo a entrada de ventilação natural. Essa limitação física pode comprometer o potencial de

renovação do ar, impactando diretamente os resultados relacionados ao desempenho da ventilação.

Além disso, registrou-se uma falha técnica no equipamento responsável pela medição da temperatura média radiante durante o turno da manhã, inviabilizando o cálculo da temperatura operativa para esse período. No turno da tarde, os dados só foram coletados na Sala 01, também devido a problemas técnicos, pois o equipamento desativou-se no trajeto para a Sala 02 e interrompeu a coleta. Dessa forma, os resultados apresentados referentes à temperatura operativa consideram apenas os dados obtidos no turno da tarde na Sala 01.

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

A seguir, serão apresentados os dados objetivos e subjetivos coletados para avaliação do conforto térmico nas salas de aula avaliada.

5.2.1 Temperatura do ar interno

A medição da temperatura do ar interno foi realizada nas Salas 01 e 02 em dois períodos do dia (manhã e tarde). Em cada sala, os dados foram coletados em três pontos – centro, próximo à janela e porta, e próximo à janela mais distante – conforme indicado na Figura 54. Os registros foram feitos em três alturas (0,10 m; 0,60 m; 1,10 m), sendo posteriormente calculada a média para cada ponto (Figuras 59 e 61).

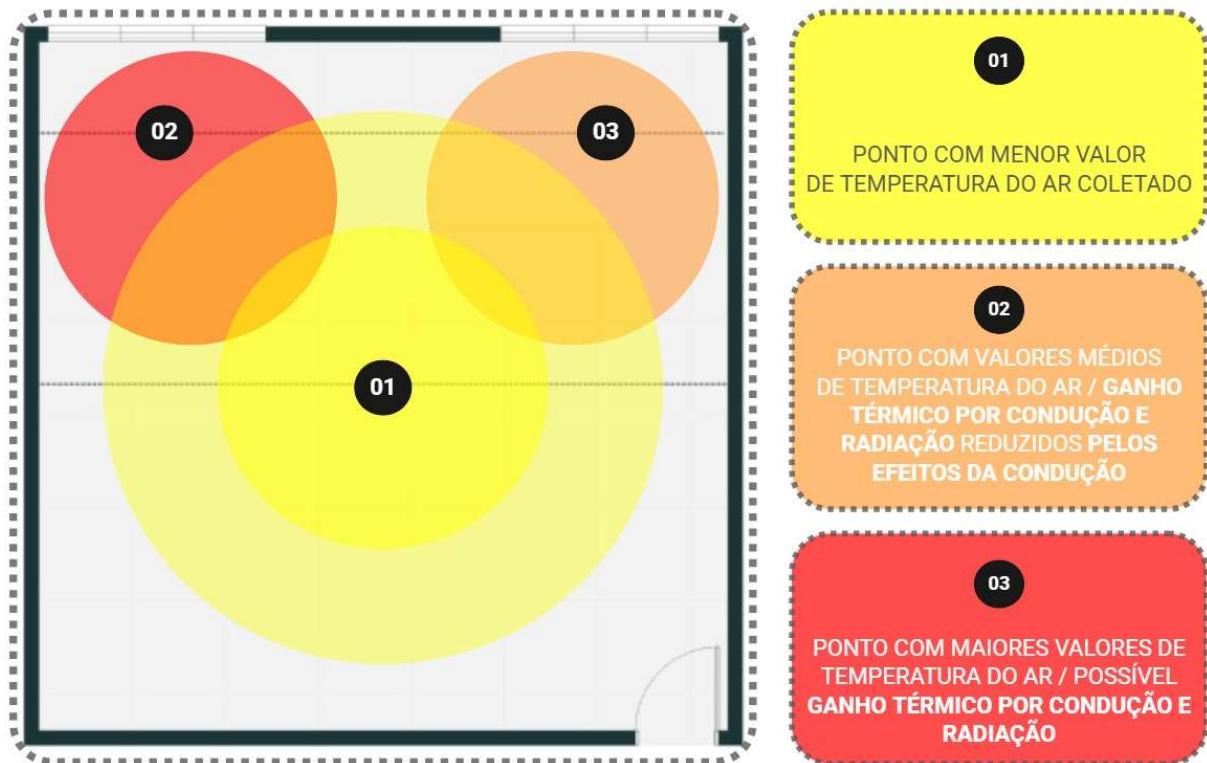
Na Sala 01, observou-se aumento progressivo da temperatura ao longo do dia. Pela manhã, as médias variaram de 28,31°C (centro) a 30,87°C (ponto mais distante). À tarde, os valores subiram para 29,49°C e 32,02°C, respectivamente. O ponto mais distante da porta permaneceu como o mais crítico, ultrapassando 32°C no período vespertino. A diferença média de temperatura entre o centro e as áreas próximas às janelas foi de cerca de 2,5°C, indicando gradiente térmico significativo (Figura 59).

Figura 59 - Análise por ponto de medição na sala 01.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 60 - Esquema de gradiente das temperaturas do ar mensuradas em cada ponto avaliado na Sala 01.



Fonte: Autor, 2025.

Na Sala 02, as temperaturas foram ligeiramente mais elevadas e aumentaram ao longo do dia. Pela manhã, variaram de 29,03°C (centro) a 31,70°C (ponto mais distante). À tarde, todas as medições aumentaram, alcançando 30,63°C no centro. Embora o ponto mais distante tenha se mantido como o mais quente, o maior

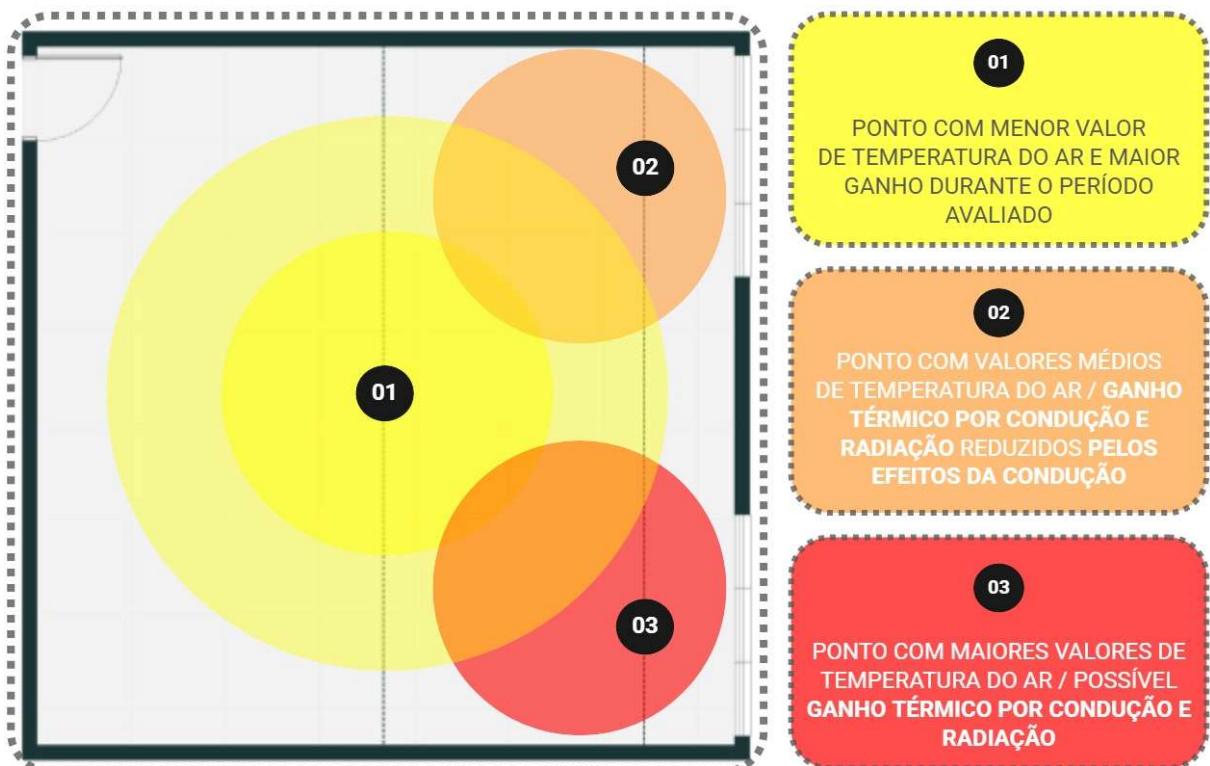
aumento ocorreu no centro ($+1,60^{\circ}\text{C}$), indicando acúmulo de calor no ambiente. A diferença entre o ponto mais frio e o mais quente reduziu-se de $2,7^{\circ}\text{C}$ para $1,3^{\circ}\text{C}$ ao longo do dia, sugerindo maior homogeneidade térmica interna com o aquecimento (Figura 60).

Figura 61 - Análise por ponto de medição na sala 02.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 62 - Esquema de gradiente das temperaturas do ar mensuradas em cada ponto avaliado na Sala 02.



Fonte: Autor, 2025.

De modo geral, todas as medições ultrapassaram 28°C, valor máximo recomendado para conforto térmico por bulbo seco no litoral nordestino (Araújo, 1996). A Sala 02 apresentou as maiores temperaturas médias, o que pode ser explicado pela sua posição mais exposta à radiação solar (Norte, Leste e Oeste), enquanto a Sala 01 recebe radiação apenas nas faces Norte e Leste.

5.2.2 Velocidade do ar interno

A aferição da velocidade do ar interno foi realizada no Ponto 01, localizado no centro geométrico de cada sala, em três alturas (0,10m, 0,60m e 1,10m). A avaliação considerou as condições de ventilação natural existentes, que diferem entre os dois ambientes em função da orientação das fachadas e da configuração das aberturas.

Na Sala 01, cujas janelas principais estão voltadas para a fachada Norte e com pequenos cobogós na parte superior na fachada Sul, a ventilação cruzada é limitada, ocorrendo apenas em alguns momentos pela porta Sul em direção à janela próxima ao ponto de medição 02 na fachada Norte. A direção predominante dos ventos na região (Leste-Sudeste) não favorece diretamente esse eixo de ventilação. Os resultados refletem essas restrições, com médias de velocidade do ar de 0,02m/s no turno da manhã e 0,23m/s no turno da tarde.

Na Sala 02, orientada para a fachada Leste e com pequenos cobogós na fachada Oeste, apresenta condição um pouco mais favorável, pois a ventilação cruzada pode ocorrer da janela próxima ao ponto 02 (Leste) em direção à porta Oeste, alinhando-se parcialmente à predominância dos ventos de Leste-Sudeste. Pela manhã, a velocidade média do ar foi de 0,27m/s e no período da tarde, as medições permaneceram estáveis com média de 0,35m/s.

De modo geral, os resultados confirmaram que ambos os ambientes apresentam ventilação insuficiente para promover conforto térmico, com destaque para a Sala 01, onde as velocidades médias do ar se mantêm muito baixas, especialmente no período da manhã. A Sala 02, mostra desempenho levemente superior, em função de sua orientação Leste e da maior compatibilidade com a direção predominante dos ventos.

Figura 63 - Valores de velocidade do ar coletadas por Sala, período e altura.

SALA	PERÍODO	ALTURA DE 0,10m	ALTURA DE 0,10m	ALTURA DE 0,10m	MÉDIA GERAL
SALA 01	MANHÃ	0,00m/s	0,00m/s	0,05m/s	0,02m/s
	TARDE	0,00m/s	0,34m/s	0,34m/s	0,23m/s
SALA 02	MANHÃ	0,00m/s	0,41m/s	0,41m/s	0,27m/s
	TARDE	0,34m/s	0,35m/s	0,35m/s	0,35m/s

Fonte: Autor, 2025.

5.2.3 Temperatura radiante média

A temperatura radiante média (Trm) foi determinada na Sala 01, no período da tarde, entre 13h55 e 14h55, utilizando um termômetro HT-810 com Datalogger inserido em um globo negro de 15cm de diâmetro, posicionado a 0,60m de altura do Ponto 01 (Centro geométrico da sala avaliada). O procedimento seguiu a metodologia descrita na ABNT NBR 16401-2:2024, que recomenda a obtenção da temperatura radiante média a partir da temperatura de globo (Tg) e das condições de ventilação do ambiente.

Durante a medição, foram registradas 20 leituras no intervalo de 30 minutos, com temperatura média do globo (Tg) de 27,2°C. A temperatura do ar (Ta) média da sala no mesmo período foi de 30,59°C, e a velocidade média do ar (Va) no Ponto 01 foi de 0,23m/s, conforme aferição prévia.

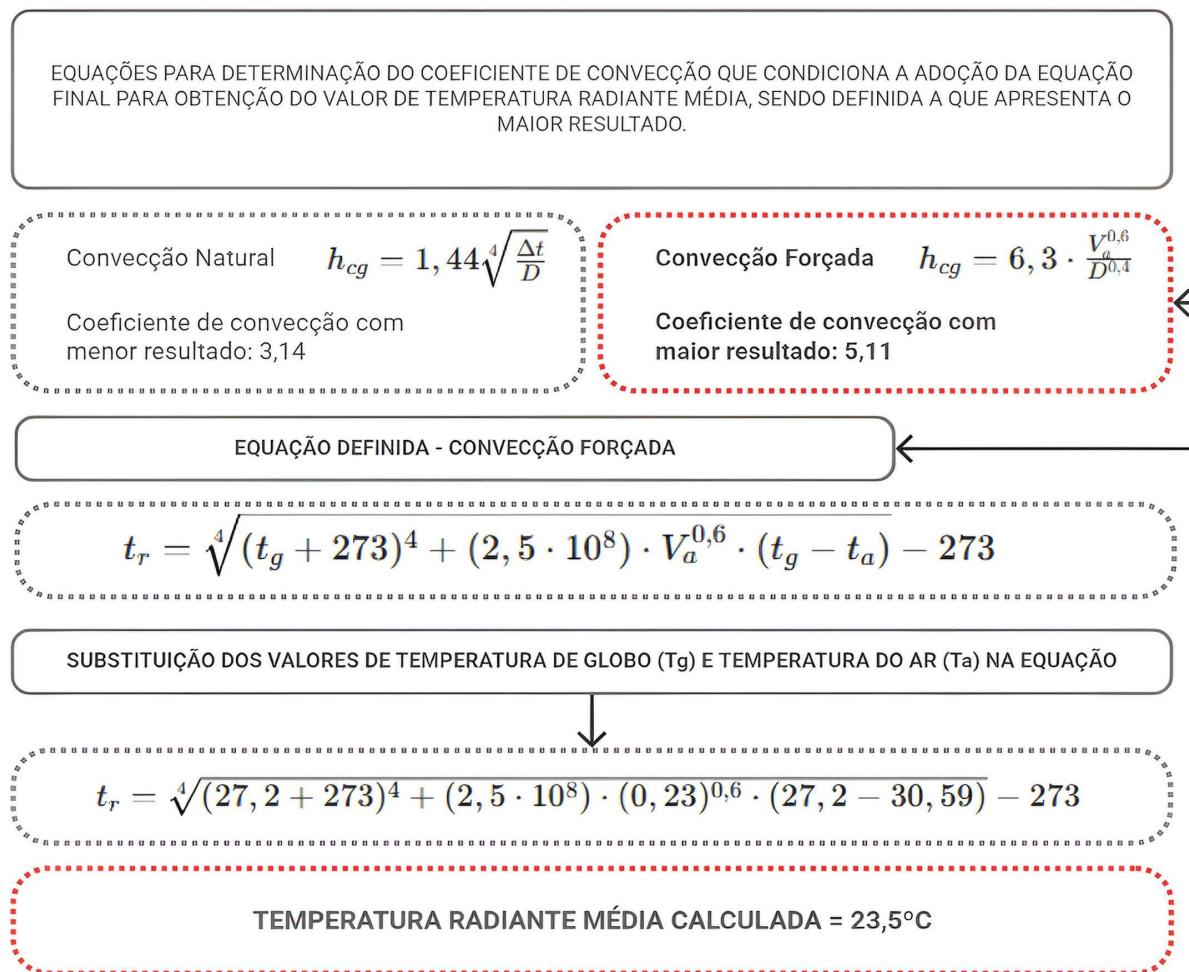
Para calcular a temperatura radiante média (Trm), foi necessário determinar o coeficiente de convecção (hcg) do ambiente. O cálculo do hcg pode ser realizado por meio de duas equações: uma para convecção natural e outra para convecção forçada, sendo a equação a ser utilizada aquela que resulta no maior valor.

Para Convecção Natural com $\Delta T = 3,29^\circ\text{C}$ e $D = 0,15\text{m}$, o coeficiente obtido foi de 3,14; Para Convecção Forçada com $V_a = 0,23\text{m/s}$ e $D = 0,15\text{m}$, o coeficiente obtido

foi de 5,11. Considerando que o resultado para a convecção forçada (5,11) é maior que o da convecção natural (3,14), esta foi a condição de ventilação adotada para a determinação da temperatura radiante média.

Com base na equação de convecção forçada e utilizando os valores medidos de temperatura de globo ($T_g = 27,2^\circ\text{C}$), temperatura do ar ($T_a = 30,59^\circ\text{C}$) e velocidade do ar ($V_a = 0,23\text{m/s}$), a temperatura radiante média calculada para a Sala 01 foi de $23,5^\circ\text{C}$.

Figura 64 - Estrutura de Cálculos para obtenção da Temperatura Radiante Média.



Fonte: Autor, 2025, a partir da ABNT NBR 16401-2:2025.

Este resultado é crucial para a análise de conforto térmico do ambiente avaliado, valor aplicado na metodologia adaptativa do conforto térmico apresentado no item a seguir.

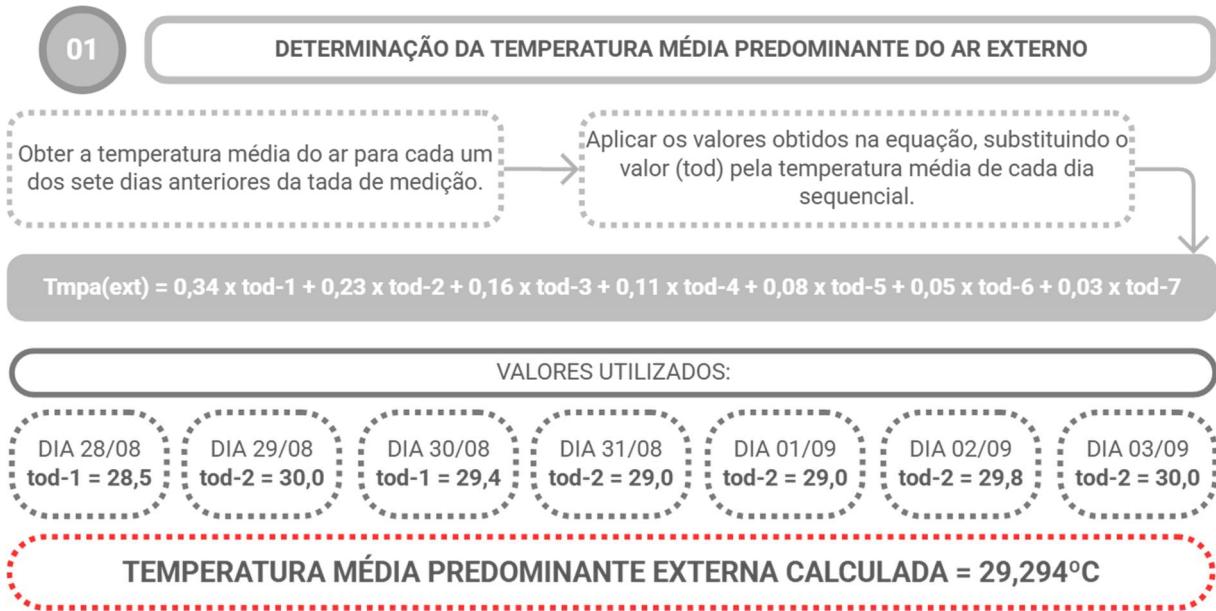
5.2.4 Aplicação do modelo adaptativo de conforto térmico

A avaliação das condições de conforto térmico na Sala 01 foi conduzida com a aplicação do modelo adaptativo, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 16401-2:2024, que se baseia na norma internacional ASHRAE 55-2023. Este modelo fundamenta-se na premissa de que a sensação de conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados é influenciada pela aclimatação dos ocupantes às condições climáticas externas.

Para a análise, foram utilizados os seguintes dados de entrada: a temperatura do ar interno ($30,59^{\circ}\text{C}$), a temperatura radiante média ($23,5^{\circ}\text{C}$) e a velocidade do ar ($0,23\text{m/s}$), bem como as temperaturas médias diárias do ar externo. Estas últimas foram obtidas a partir de dados meteorológicos diários fornecidos pela plataforma Clima Tempo, que se baseia na coleta de informações meteorológicas para a região.

O primeiro procedimento metodológico consistiu na determinação da temperatura média predominante do ar externo ($\text{Tmpa}(\text{ext})$). As temperaturas médias diárias dos sete dias antecedentes à medição foram utilizadas na equação ponderada da norma (Figura 68). O cálculo resultou em um valor de $29,294^{\circ}\text{C}$ para $\text{Tmpa}(\text{ext})$.

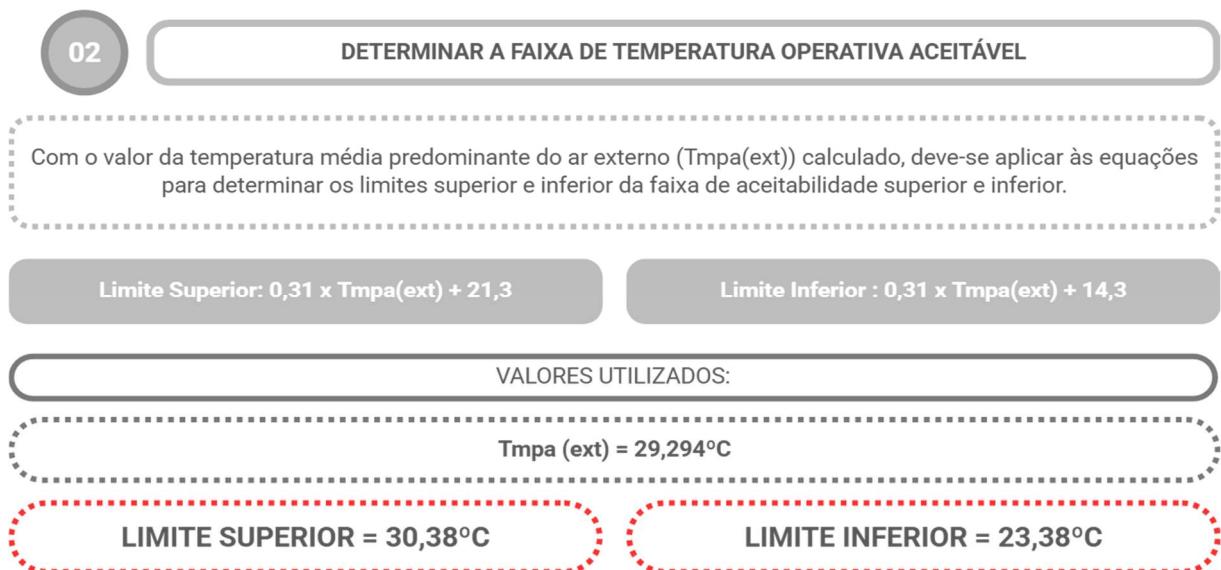
Figura 65 - Equação para obtenção do valor da temperatura média predominante do ar externo.



Fonte: Autor, 2025, a partir da ABNT NBR 16401-2:2025.

Com o valor de Tmpa (ext) estabelecido, procedeu-se à determinação da faixa de temperatura operativa aceitável, que indica o intervalo no qual 80% dos ocupantes se sentem confortáveis. Utilizando as equações da norma, os limites superiores e inferior da faixa foram calculados em 30,38°C e 23,38°C, respectivamente. (Figura 69).

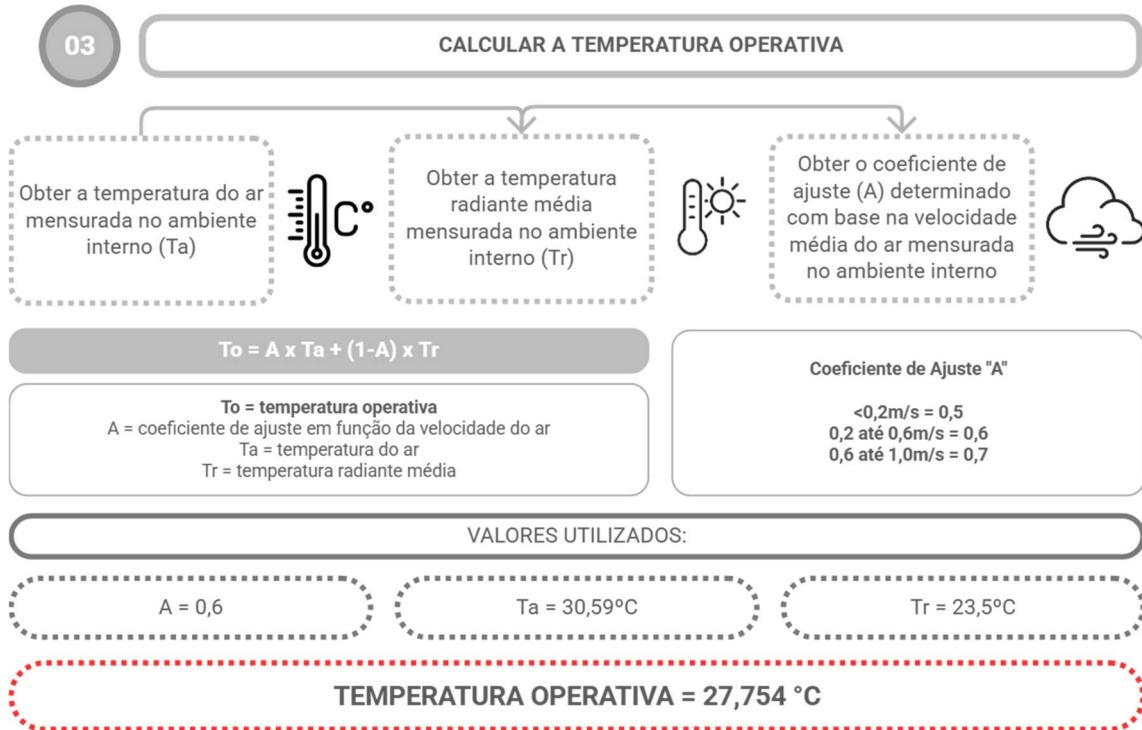
Figura 66 - Equação para obtenção dos limites superior e inferior de aceitabilidade térmica.



Fonte: Autor, 2025, a partir da ABNT NBR 16401-2:2025.

Em paralelo, a temperatura operativa (T_o) do ambiente interno foi calculada a partir dos dados de medição. Com uma velocidade do ar de 0,23m/s, o coeficiente de ajuste (A) de 0,6 foi aplicado, resultando em uma temperatura operativa de 27,754°C (Figura 70).

Figura 67 - Procedimento para cálculo da temperatura operativa.

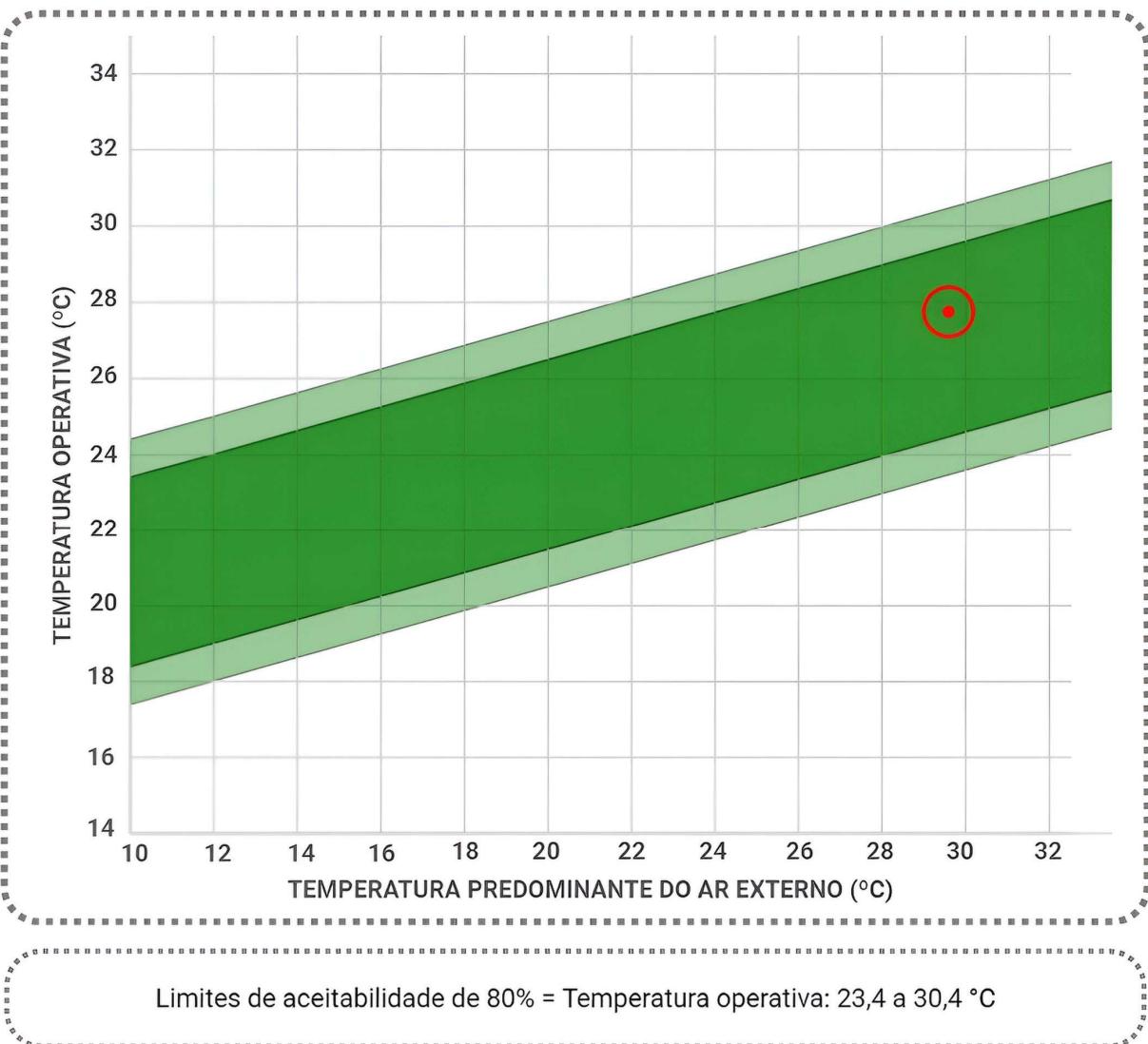


Fonte: Autor, 2025, a partir da ABNT NBR 16401-2:2025.

Considerando que a velocidade do ar medida não ultrapassou 0,3m/s, não se aplicou o ajuste aos limites de aceitabilidade previstos na norma. A temperatura operativa calculada para a Sala 01, de 27,754°C, enquadra-se de maneira efetiva na faixa de conforto aceitável, compreendida entre 23,38°C e 30,38°C, apresentando que o ambiente avaliado, a partir da avaliação de conforto térmico utilizando o método adaptativo, encontra-se em conforto para os usuários aclimatados no ambiente naturalmente ventilado.

Essa conclusão foi corroborada por uma análise na ferramenta de conforto térmico CBE (*Center for the Built Environment*), que confirmou os resultados obtidos pelos cálculos manuais. O gráfico adaptativo gerado pela ferramenta (Figura 71), ilustra visualmente a temperatura operativa dentro da zona de conforto, entre os limites superior e inferior de conforto térmico, reforçando que as condições térmicas na Sala 01, no período avaliado, são consideradas aceitáveis para a maioria dos ocupantes de acordo com os critérios do modelo adaptativo.

Figura 68 - Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados (Sala 01).



Fonte: Autor, 2025, a partir do CBE, 2025.

5.2.5 Resultado dos questionários

A avaliação subjetiva do conforto térmico foi realizado por meio de questionários semiestruturados, aplicados a um total de 25 alunos, sendo 14 na Sala 01 e 11 na Sala 02, no período da tarde. As perguntas foram baseadas nas diretrizes da ABNT NBR 16401-2:2024, que utilizam escalas de sensação, preferência e percepção para atender como os usuários se relacionam com as condições térmicas do ambiente (Figura 62).

5.2.5.1 Análise da Sensação Térmica (Escala Sétima de Votos)

A primeira pergunta, que utilizou a escala se sensação térmica, revelou que a maioria dos alunos sentia calor. Na Sala 01, 714% dos participantes reportou estar com "calor" ou com "muito calor". Na Sala 02, o percentual foi de 27%.

28,6% dos usuários entrevistados na Sala 01 e 18% na Sala 02 se sentiram "confortáveis". Conforme as observações coletadas, esses votos de conforto vieram de alunos sentados nas áreas de maior ventilação, próximo ao ponto de medição 02, fator que reforça a influência da ventilação natural na percepção de conforto dos ocupantes, mesmo em ambientes com altas temperaturas.

Apesar da diferença nas porcentagens, ambas as salas mostram uma predominância de respostas indicando desconforto por calor, o que se alinha aos dados objetivos de temperatura do ar interno, que superaram 28°C em todos os pontos de medição (conforme item 5.2.1).

5.2.5.2 - Preferência Térmica e Percepção do Ambiente

Em relação à preferência térmica, a maioria dos usuários avaliados em ambas as salas expressou o desejo de estar "mais frio". Com 92,8% de respostas "mais frio" para a sala 01 e 81,9% na sala 02.

Apenas um aluno em cada sala votou para "não mudar", e em ambos os casos, eram alunos sentados nas áreas de maior ventilação.

Os resultados da pergunta sobre a percepção do conforto térmico da sala reforçam a insatisfação dos usuários. Apenas um aluno na Sala 01 e dois na Sala 02 consideraram o ambiente "aceitável". Na Sala 01, 35,7% dos alunos consideraram as condições "inaceitáveis", enquanto na Sala 02, 54,5% deram esse mesmo voto. Os votos de "neutro" também foram significativos, indicando que, embora não considerem as condições ideais, os alunos podem ter se adaptado ao clima ambiente.

5.2.5.3 Análise da Sensação e Preferência por Ventilação

As perguntas sobre a ventilação corroboram a insatisfação térmica. Na Sala 01, 78,6% dos alunos sentiram que a ventilação era "pouca", e 84,6% preferiam "maior ventilação". Na Sala 02, 72,7% sentiram "pouca ventilação", e 90,9% preferiram "maior ventilação". Esses resultados mostram uma clara relação entre a percepção de ventilação insuficiente e a necessidade de maior ventilação para alcançar o conforto térmico.

A análise conjunta das respostas do questionário sobre percepção de ventilação e dos dados de velocidade do ar coletados nos ambientes demonstra a ineficácia da ventilação natural nas salas e sua influência direta na sensação e percepção térmica dos usuários. Apesar da Sala 02 ter apresentado uma velocidade do ar média um pouco superior (0,35m/s) à Sala 01 (0,23m/s), o percentual de alunos insatisfeitos com a ventilação é alto em ambos os ambientes.

As respostas dos questionários, portanto, alinharam-se aos dados objetivos de medição. A alta temperatura do ar interno e a baixa velocidade do ar resultam em uma percepção predominante de desconforto e calor, evidenciando a necessidade de melhorias nas condições de ventilação e sombreamento das salas de aula.

5.3 AFERIÇÃO DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS

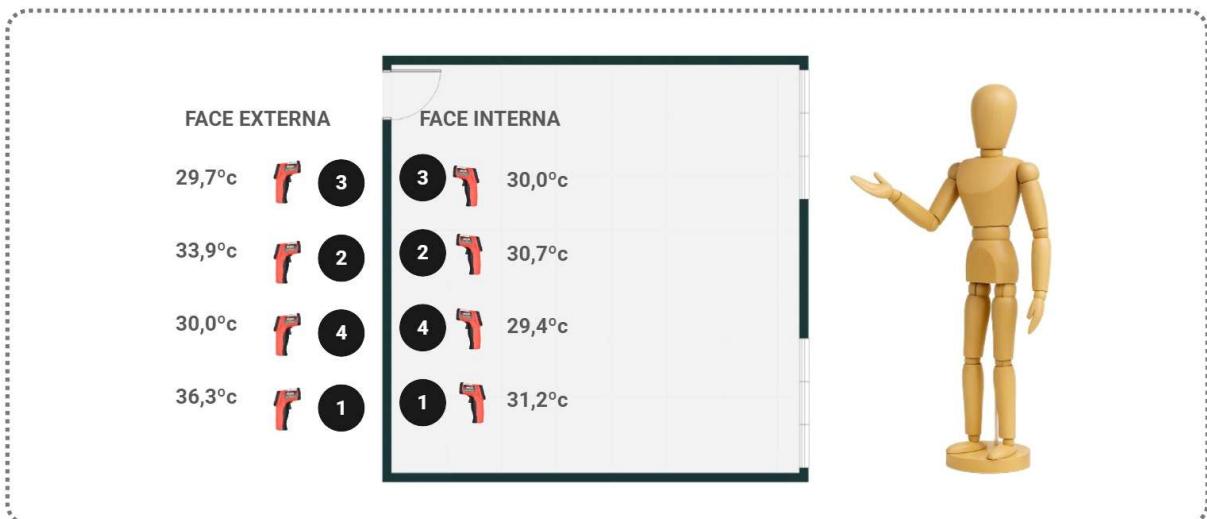
A coleta de dados foi realizada por meio de câmera termográfica e termômetro infravermelho, conforme metodologia descrita na Seção 5.1.2. As medições ocorreram na fachada oeste da Sala 02, às 14h, período caracterizado pela maior incidência de radiação solar direta.

Foram definidos quatro pontos distintos em uma mesma parede, de modo a permitir a comparação entre diferentes condições de exposição e tratamento da envoltória: Ponto 01, correspondente à alvenaria sem qualquer tipo de proteção, totalmente exposta à radiação solar direta; Ponto 02, localizado em trecho sombreado

por vegetação; Ponto 03, em área parcialmente sombreada, com aplicação de placa de EPS (poliestireno expandido) de 20 mm na face externa da parede; e Ponto 04, com aplicação de placa de EPS de 20 mm nas faces externa e interna da parede, estando a face externa totalmente exposta à radiação solar direta.

Os valores de temperatura superficial obtidos por meio do termômetro infravermelho para cada ponto de medição são apresentados na Figura 69, enquanto os registros das faces externa e interna são detalhados na Figura 70.

Figura 69 - Pontos de medição da temperatura superficial externa.



Fonte: Autor, 2025.

A análise dos dados evidencia a influência combinada das propriedades térmicas dos materiais e das estratégias passivas adotadas.

No Ponto 01, desprovido de qualquer proteção, a parede de alvenaria apresentou as maiores temperaturas superficiais externa e interna, evidenciando a elevada absorção da radiação solar e a alta transmitância térmica do sistema construtivo.

No Ponto 02, a presença de vegetação promoveu redução significativa da temperatura superficial externa e, de forma correlata, da temperatura interna, comprovando a eficácia do sombreamento como estratégia passiva de mitigação dos ganhos térmicos por radiação.

Figura 70 - Temperaturas superficiais mensuradas em cada ponto de medição (Face Externa e Interna).

MEDIÇÃO EXTERNA



MEDIÇÃO INTERNA



Fonte: Autor, 2025.

No Ponto 03, onde a aplicação do EPS na face externa foi associada ao sombreamento parcial, registraram-se menores valores de temperatura superficial externa em comparação aos pontos sem proteção, evidenciando a ação conjunta do sombreamento e da capacidade isolante do material. Entretanto, a temperatura superficial interna manteve-se próxima à observada no Ponto 02, indicando que a difusão lateral de calor nas áreas não protegidas da envoltória limitou o desempenho do isolamento aplicado apenas externamente.

Já o Ponto 04, apesar de estar totalmente exposto à radiação solar direta, apresentou a menor temperatura superficial interna entre os pontos analisados, demonstrando a maior eficiência do isolamento térmico aplicado em ambas as faces da parede na redução da carga térmica transmitida ao ambiente interno. Esses resultados reforçam a relevância do uso combinado de estratégias de isolamento e sombreamento para o aprimoramento do desempenho térmico da envoltória em edificações escolares situadas em clima quente e úmido.

Cabe destacar que, por se tratar de uma intervenção pontual, a placa de EPS protegeu apenas parte da superfície, permitindo a transferência lateral de calor das áreas não isoladas para a região protegida, o que atenuou o impacto do isolamento na medição interna. Ainda assim, os resultados confirmam que a adoção de materiais isolantes na envoltória contribui para a redução das cargas térmicas internas, favorecendo o conforto dos usuários e diminuindo a demanda por sistemas artificiais de climatização. No contexto do conforto térmico, a temperatura superficial é uma variável relevante, pois participa das trocas de calor por condução com o ambiente (Frota, Schiffer, 2001). Superfícies mais frias reduzem o desconforto localizado e a sensação de calor radiante, colaborando para o alcance da temperatura operativa indicada pelo modelo adaptativo de conforto térmico (ABNT NBR 16401-2:2024).

Os registros da câmera termográfica corroboram os achados apresentados, evidenciando, de forma gráfica, as áreas com menor emissão térmica, especialmente na região isolada com EPS (Figura 71).

Figura 71 -Temperaturas superficiais mensuradas em cada ponto de medição (Face Interna).



Fonte: Autor, 2025.

Em síntese, os resultados demonstram que a combinação de estratégias de sombreamento e aplicação de materiais isolantes, como EPS, potencializa o desempenho térmico da edificação, reforçando a importância de soluções passivas para a melhoria do conforto térmico em climas quentes e úmidos.

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA AVALIAÇÃO

A discussão dos resultados obtidos a partir das medições objetivas – temperatura do ar, velocidade do ar e temperatura média radiante –, das respostas subjetivas dos usuários e da aferição das temperaturas superficiais da envoltória evidencia a necessidade de se pensar o condicionamento térmico passivo em edificações escolares existentes. A integração desses diferentes métodos de análise

possibilitou uma compreensão mais ampla do desempenho térmico das salas avaliadas e de sua relação direta com a percepção de conforto térmico dos usuários.

Os dados obtidos indicam temperaturas do ar sistematicamente superiores ao limite de 28 °C recomendado para a região (Araújo, 1996), caracterizando condições gerais de desconforto térmico em ambas as salas. Observou-se que as áreas próximas às paredes e às aberturas apresentaram os maiores valores de temperatura, evidenciando a influência da envoltória no ganho de calor por condução e radiação. A Sala B apresentou comportamento mais crítico em determinados períodos, em função da maior incidência de radiação solar direta sobre suas fachadas, favorecendo o acúmulo térmico ao longo do dia.

A análise da ventilação natural confirmou sua insuficiência, sobretudo na Sala A, cuja orientação das aberturas (fachada norte) não se alinha à direção predominante dos ventos locais (Leste–Sudeste). Na Sala B, embora as aberturas voltadas para a fachada leste apresentem maior compatibilidade com os ventos predominantes, os valores de velocidade do ar permaneceram baixos para garantir conforto térmico nos horários de maior carga térmica, indicando limitação da ventilação cruzada efetiva.

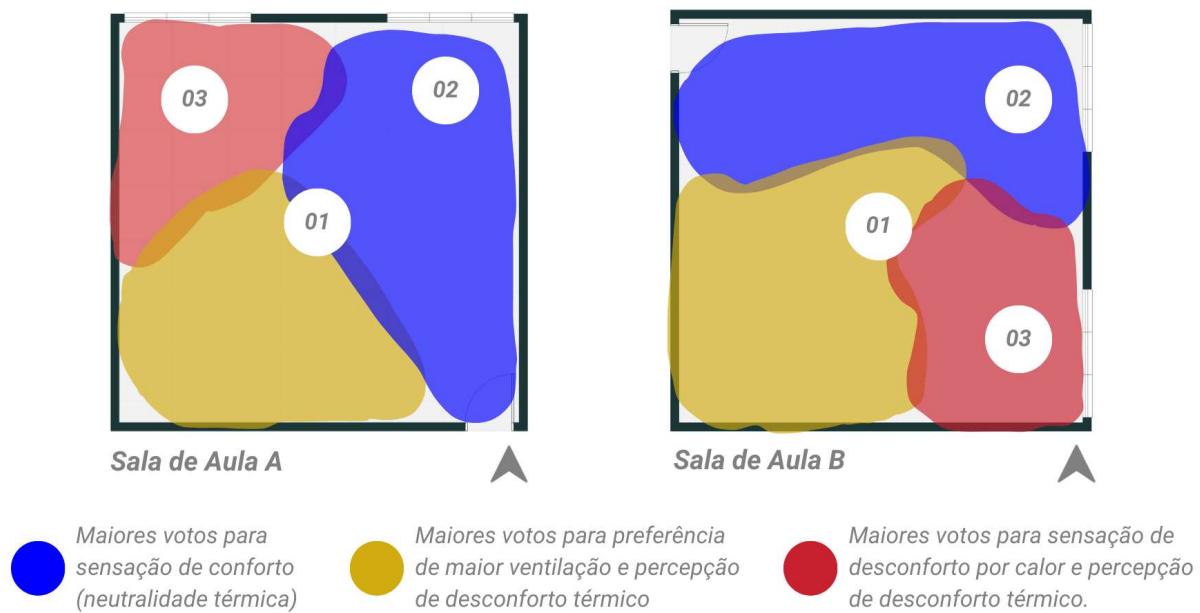
A relação entre os pontos de medição e os resultados subjetivos de conforto térmico, apresentada na Figura 72, reforça a importância dos efeitos convectivos, da proximidade com as superfícies e da distribuição espacial do ar no interior das salas. A análise integrada demonstra que o Ponto 01, em ambas as salas, concentrou os maiores votos para sensação de neutralidade térmica e para sensação de “ligeiramente quente”, estando associado aos menores valores de temperatura do ar medidos. Essa condição pode ser explicada por sua posição mais afastada das superfícies mais aquecidas da envoltória e por menor influência direta da radiação térmica emitida por paredes e esquadrias.

No Ponto 02, onde foram registrados valores intermediários de temperatura do ar, observou-se maior número de votos associados à neutralidade térmica e à percepção de ventilação. Tal comportamento está diretamente relacionado à posição estratégica desse ponto em relação às aberturas, favorecendo a circulação do ar e a intensificação das perdas convectivas de calor. A configuração das aberturas cria

uma espécie de “esteira de vento”, aumentando a sensação de frescor mesmo em condições térmicas objetivas semelhantes às de outros pontos do ambiente.

Por sua vez, o Ponto 03 apresentou os maiores valores de temperatura do ar e as menores velocidades de vento, concentrando os votos associados à sensação de “quente” e maior desconforto térmico. Essa condição decorre da menor incidência de ventilação natural, somada à maior proximidade com superfícies aquecidas da envoltória, o que intensifica tanto os ganhos de calor por radiação quanto a redução das trocas convectivas, agravando a sensação térmica percebida pelos usuários.

Figura 72 - Registros realizados com a câmera termográfica.



Fonte: Autor, 2025.

Esses resultados evidenciam que a experiência térmica não é homogênea no espaço e que pequenas variações na posição do usuário em relação às aberturas, às superfícies e ao fluxo de ar impactam significativamente a percepção de conforto. As aparentes contradições entre os resultados do modelo adaptativo de conforto térmico e as respostas dos usuários reforçam essa complexidade. Embora o modelo tenha indicado aceitabilidade térmica em determinados momentos, a percepção

predominante de desconforto por calor revela a influência decisiva de fatores como ventilação insuficiente, ar estagnado e assimetrias térmicas no ambiente.

Os achados relativos às temperaturas superficiais da envoltória corroboram essa leitura integrada. A redução significativa das temperaturas nas áreas sombreadas e nas superfícies com aplicação de EPS demonstra o potencial das estratégias passivas na mitigação dos ganhos térmicos por radiação solar direta. Ainda que as intervenções tenham sido pontuais, os resultados indicam que pequenas modificações na envoltória já produzem benefícios mensuráveis, em consonância com as diretrizes da ABNT NBR 15220-3:2022 para edificações situadas em clima quente e úmido.

Em síntese, as evidências apontam que estratégias arquitetônicas passivas são indispensáveis para a melhoria do conforto térmico nos ambientes escolares avaliados. A qualificação do sombreamento das fachadas e aberturas, a ampliação da ventilação cruzada efetiva e o uso de materiais com melhor desempenho térmico configuram medidas prioritárias. Essas soluções contribuem não apenas para a redução das cargas térmicas internas, mas também para a diminuição da dependência de sistemas artificiais de climatização, promovendo eficiência energética, sustentabilidade e melhores condições de aprendizagem.

06

DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS E ELEBORAÇÃO DA CARTILHA

Nesta seção, serão apresentadas as estratégias arquitetônicas para a requalificação térmica de edificações escolares construídas no município de Macaíba/RN.

A definição dessas estratégias foi orientada pela base teórica referente ao projeto bioclimático, à eficiência e ao desempenho térmico de edificações (Bogo et al., 1994; Frota; Schiffer, 2001; Lamberts; Dutra; Pereira, 2014) e pelos resultados da avaliação de conforto térmico realizado na Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho, estudo de caso que forneceu dados qualitativos que indicam a necessidade de adaptação da edificação para alcançar o conforto térmico dos usuários, servindo como subsídio para nortear as soluções. Complementarmente, considerou-se o referencial empírico e, sobretudo, o contexto de aplicação em edificações escolares existentes no município de Macaíba/RN. Desse modo, buscou-se direcionar as estratégias de condicionamento térmico passivo de forma a garantir a viabilidade e a aplicabilidade das intervenções nas construções existentes.

Por fim, será apresentado o processo de elaboração da cartilha, um guia formativo que apresentará os conceitos dos processos de regulação térmica entre a edificação e o ambiente externo, e as estratégias de condicionamento térmico passivo para a requalificação de edificações escolares construídas em um contexto de clima quente e úmido.

6.1 - ESQUEMA DE ESTRATÉGIAS PARA REQUALIFICAÇÃO TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES EXISTENTES

As estratégias de requalificação térmica foram estruturadas com base nos quatro processos de regulação térmica entre a edificação e o ambiente externo: Radiação, Condução, Convecção e Evaporação.

A organização dessas estratégias parte da compreensão dos conceitos teóricos para sua aplicação prática. Considerando que uma intervenção isolada pode não ser suficiente e que cada estratégia frequentemente abrange múltiplas finalidades e relações com os processos reguladores, as propostas foram agrupadas em três eixos principais de intervenção: Eixo I – Controle da radiação solar; Eixo II – Controle do ganho térmico em superfícies; e Eixo III – Uso otimizado de elementos vazados.

6.1.1 - Controle de Radiação Solar (Eixo I)

O Eixo I concentra estratégias relacionadas ao controle da radiação solar, tendo a radiação como principal processo regulador. Esse conjunto de ações visa limitar a incidência de radiação direta tanto nas superfícies da envoltória (paredes) quanto nas aberturas (janelas, portas e elementos vazados), reduzindo de forma significativa o ganho térmico interno.

6.1.1.1 - Sombreamento com elementos horizontais

Indicando para fachadas Norte e Sul, contempla a ampliação de beirais, instalação de toldos, marquises, brises horizontais, além do uso de caramanchões e pergolados. Esses elementos bloqueiam a radiação solar incidente principalmente nos períodos de maior elevação solar.

Figura 73 - Sombreamento com beiral ampliado e brises horizontais.

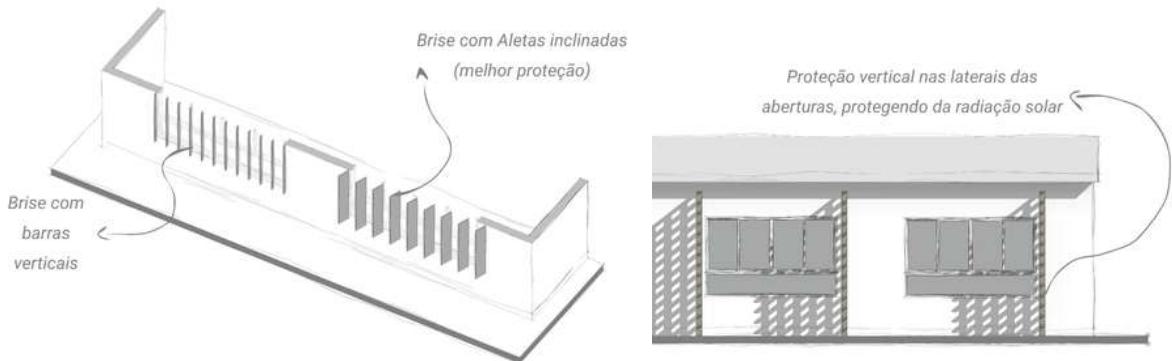


Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

6.1.1.2 - Sombreamento com elementos verticais

Recomendado para fachadas Leste e Oeste, onde a radiação incide com menor ângulo. As estratégias incluem brises verticais e proteções posicionadas lateralmente e aberturas e superfícies, reduzindo a exposição.

Figura 74 - Sombreamento com brises verticais e proteções laterais.



Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

6.1.1.2 - Sombreamento com elementos verticais

A vegetação é utilizada como elemento de proteção e resfriamento microclimático. Sugere-se o plantio de árvores de copas amplas para sombrear a envoltória e o entorno da edificação, reduzindo a temperatura do ambiente externo. Além disso, trepadeiras e jardins verticais podem ser aplicados diretamente nas paredes ou em elementos complementares, como cabos de aço, caramanchões horizontais ou verticais e até nas coberturas. Essa estratégia atua de forma integrada sobre radiação, condução e evaporação, ao promover sombreamento, reduzir o ganho térmico nas superfícies e resfriar o ar por meio de processos evaporativos.

Figura 75 - Sobreando com árvores de copa ampla.



Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

6.1.2 – Controle do ganho térmico em superfícies (Eixo II)

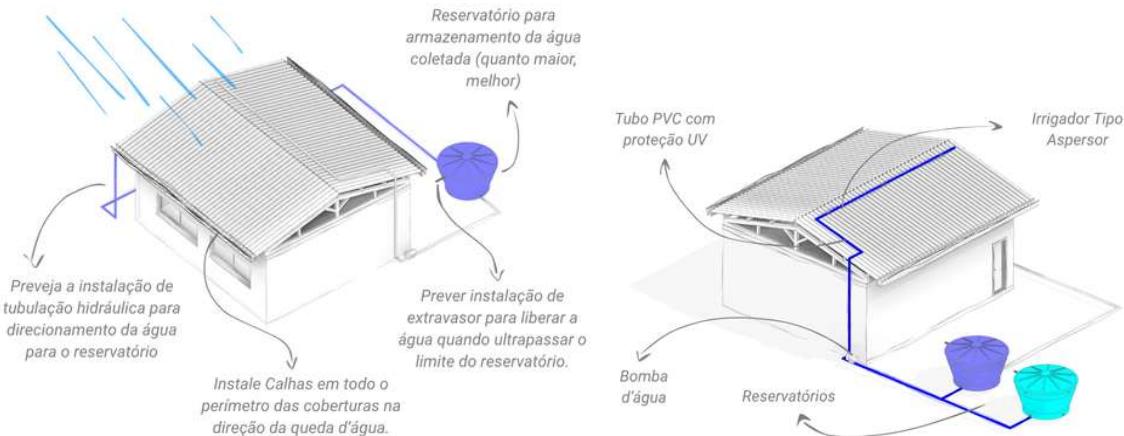
O Eixo II reúne estratégias voltadas para a redução do ganho térmico das superfícies, tendo a condução como processo regulador predominante. As soluções são organizadas em duas frentes principais: coberturas e paredes, considerando a influência direta desses componentes na transferência de calor para os ambientes internos.

6.1.2.1 – Coberturas

Para telhas cerâmicas, recomenda-se a manutenção periódica, evitando o acúmulo de sujeira que reduz a refletância do material. No caso de telhas de fibrocimento, indica-se a aplicação de pintura térmica branca para diminuir a absorção de calor.

A instalação de forros é proposta como meio de aumentar a resistência térmica, dificultando a passagem do calor da cobertura para o interior. Adicionalmente, é indicada a aspersão de água nas coberturas, por meio de sistema baseado em coleta e armazenamento de água pluvial, promovendo o resfriamento evaporativo da superfície.

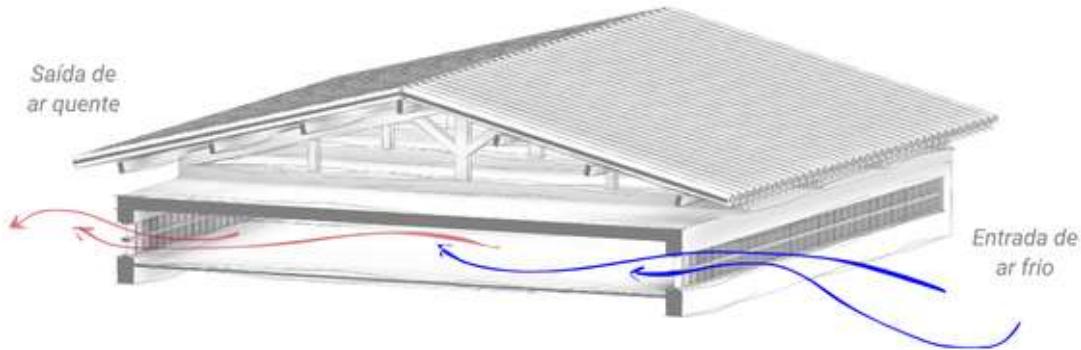
Figura 76 - Sistema de coleta de água pluvial e aspersão para resfriamento da cobertura.



Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

O eixo também contempla o uso da convecção como mecanismo de troca térmica entre as camadas da cobertura. Estratégias como a criação de aberturas entre telha e laje, telha e forro ou laje e forro, bem como a elevação da cobertura, permitem que o ar aquecido seja substituído por ar mais frio, favorecendo o desempenho térmico.

Figura 77 - Instalação de cobogós entre o forro e laje para troca de ar quente.

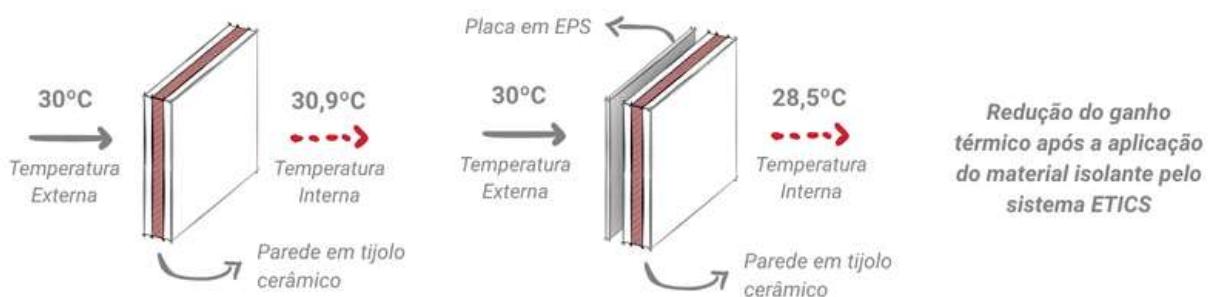


Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

6.1.2.2 – Paredes

Nas fachadas que recebem maior incidência de radiação solar, recomenda-se a utilização do sistema ETICS (External Thermal Insulation Composite System), que consiste na aplicação de material isolante na face externa das superfícies da edificação. Esse sistema aumenta a resistência térmica da envoltória e contribui para a redução do ganho térmico por condução.

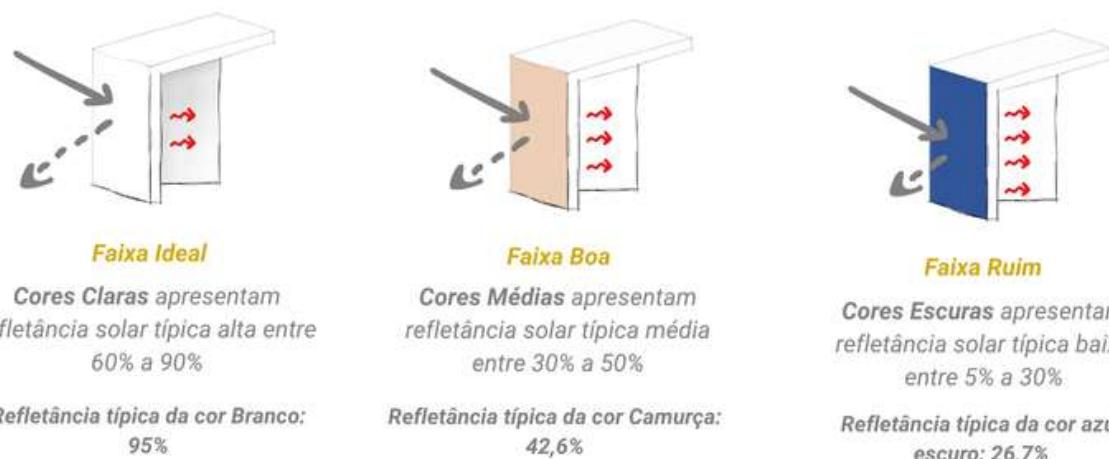
Figura 78 - Sistema de isolamento térmico pelo exterior.



Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

Outra estratégia indicada é a aplicação de pinturas em cores claras, que reduz a absorção térmica das paredes ao aumentar a refletância superficial, diminuindo, assim, o aquecimento das alvenarias expostas ao sol.

Figura 79 - Esquema prático para decisão de cor das fachadas.



Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

6.1.3 – Uso otimizado de elementos vazados (Eixo III)

O Eixo III apresenta estratégias que envolvem o uso de elementos vazados, com ênfase no cobogó como solução arquitetônica de relevância para a ventilação e sombreamento. O processo regulador predominante neste eixo é a convecção, embora a radiação também desempenhe papel importante em determinadas configurações.

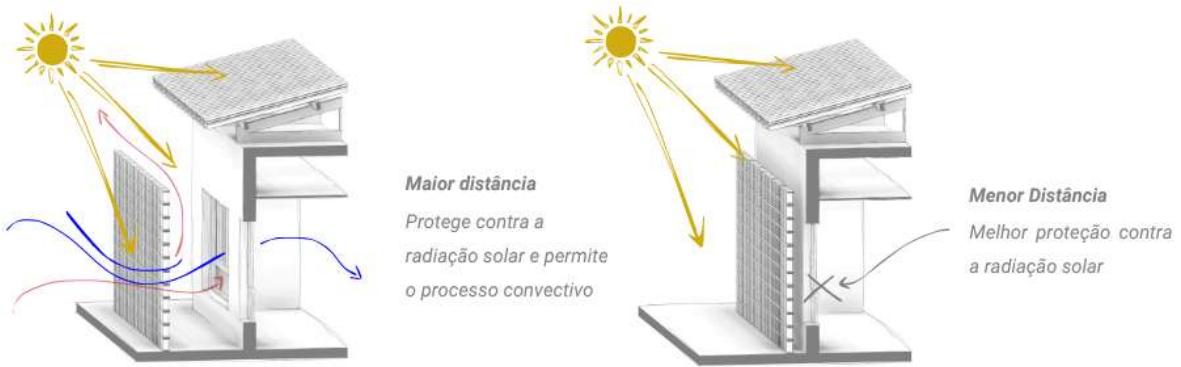
Nessa perspectiva, são analisados os aspectos relacionados à dimensão formato e materialidade dos elementos vazados. Recomenda-se o uso de materiais cerâmicos devido à menor condutividade térmica, evitando o superaquecimento, e a aplicação de pintura clara em elementos de concreto, favorecendo maior refletância. A relação entre formato e dimensão define o desempenho pretendido, onde elementos vazados com maiores aberturas são mais eficientes para ventilação e com menores aberturas para sombreamento.

Também são destacados cuidados relacionados ao conforto ambiental, como a proteção dos elementos vazados contra a radiação direta, para evitar a entrada de calor excessivo, e a recomendação de evitar seu uso em fachadas voltadas para fontes intensas de ruído, por questões de conforto acústico.

6.1.3.1 – Estratégia de Segunda Pele com Cobogós

Aplicação de um plano externo de elementos vazados para sombreamento da fachada. A distância entre esse plano e a parede é determinante: distâncias maiores reduzem o sombreamento direto, porém ampliam os efeitos convectivos e a ventilação do colchão de ar.

Figura 80 - Relação entre a distância e a eficiência da estratégia.



Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

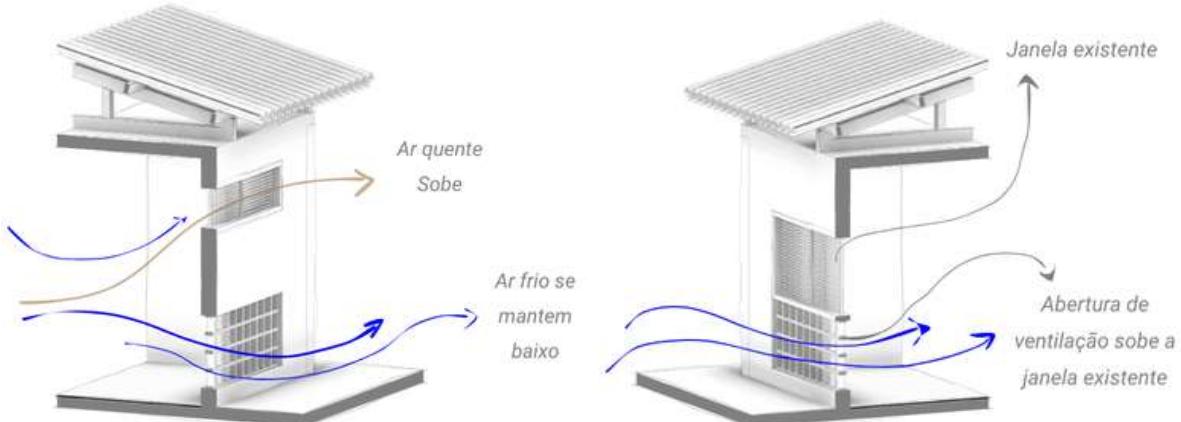
6.1.3.2 – Ventilação Permanente

Baseada nos princípios da ventilação cruzada — aberturas em lados opostos, diferença de pressão, entrada menor que a saída, movimento ascendente do ar quente e descendente do ar frio e alinhamento com a direção predominante dos ventos. O cobogó pode atuar como entrada ou saída de ar, ampliando a circulação natural.

6.1.3.3 – Peitoril Ventilado

Indicado para situações em que a implantação ou o espaço disponível não permitem a criação de novas aberturas em paredes opostas. Nesse caso, a instalação de cobogós na parte inferior das janelas existentes possibilita ampliar a entrada de ar no ambiente interno, favorecendo o resfriamento natural.

Figura 81 - Abertura inferior para ventilação e peitoril ventilado.



Fonte: Cartilha de conforto térmico em edificações escolares existentes (Autor, 2025).

6.2 – APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS NO OBJETO DE ESTUDO

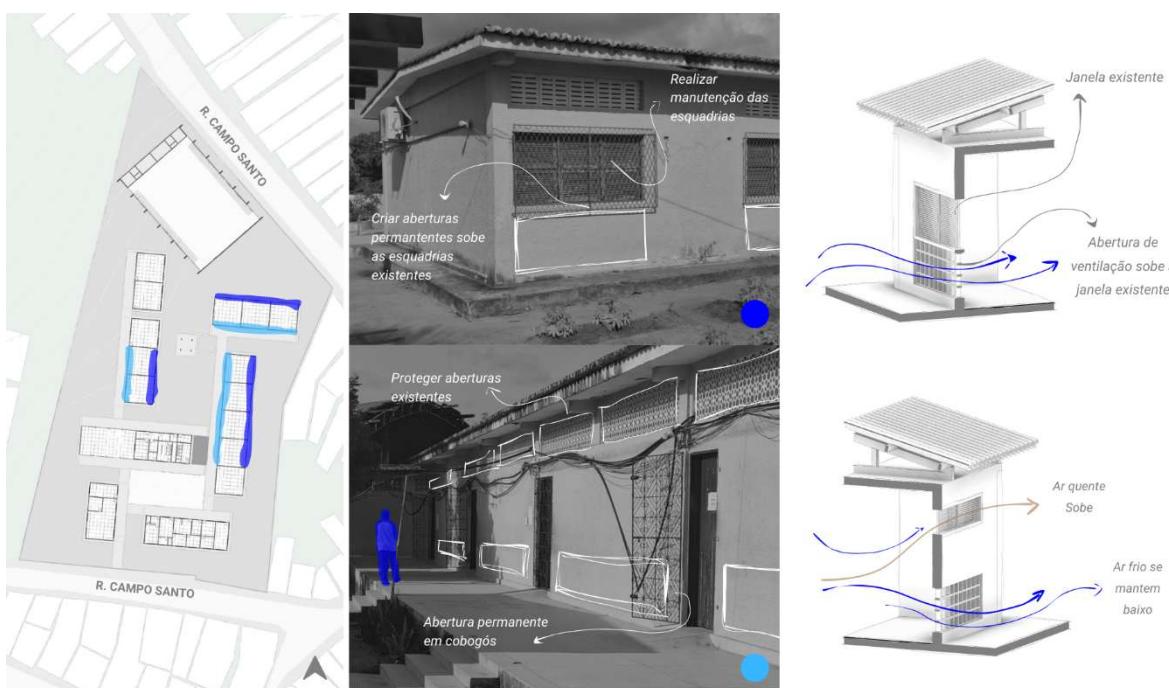
A partir da avaliação do conforto térmico realizada *in loco* na edificação da Escola Estadual Alfredo Mesquita Filho e das estratégias passivas sistematizadas na cartilha desenvolvida nesta pesquisa, definiu-se a aplicação objetiva de soluções compatíveis com as especificidades construtivas, funcionais e climáticas do objeto de estudo.

Dentre o conjunto de estratégias apresentadas na cartilha, foram selecionadas aquelas com maior potencial de impacto positivo sobre o desempenho térmico da escola, sendo indicadas de forma objetiva por meio de esquemas com linhas de chamada, apontando os locais adequados para sua aplicação, conforme apresentado nas Figuras 82 a 85.

Nos blocos de salas de aula – ambientes de maior permanência dos alunos e nos quais se busca priorizar o uso da ventilação natural, sem a instalação de sistemas de ar-condicionado – indica-se a ampliação e a requalificação do uso de elementos vazados. Recomenda-se a instalação de peitoril ventilado com cobogós sobre as esquadrias existentes, posicionados sobre um peitoril opaco de 20 cm, de modo a evitar a entrada direta de água no ambiente interno. Também se indica a abertura em fachadas opostas, com a aplicação de cobogós, favorecendo a ventilação cruzada e a intensificação das trocas convectivas.

Nas áreas de circulação, propõe-se a instalação de aberturas baixas, com altura máxima de 1,00 m, solução que permite a entrada e a saída de ar, preservando a privacidade visual dos ambientes internos e reduzindo a entrada excessiva de ruídos provenientes das áreas externas e de circulação. As aberturas em cobogó já existentes devem ser mantidas, sendo complementadas com dispositivos de sombreamento, de modo a evitar a incidência direta da radiação solar no interior da edificação (Figura 82).

Figura 82 - Estratégias de ventilação aplicáveis ao objeto de estudo.

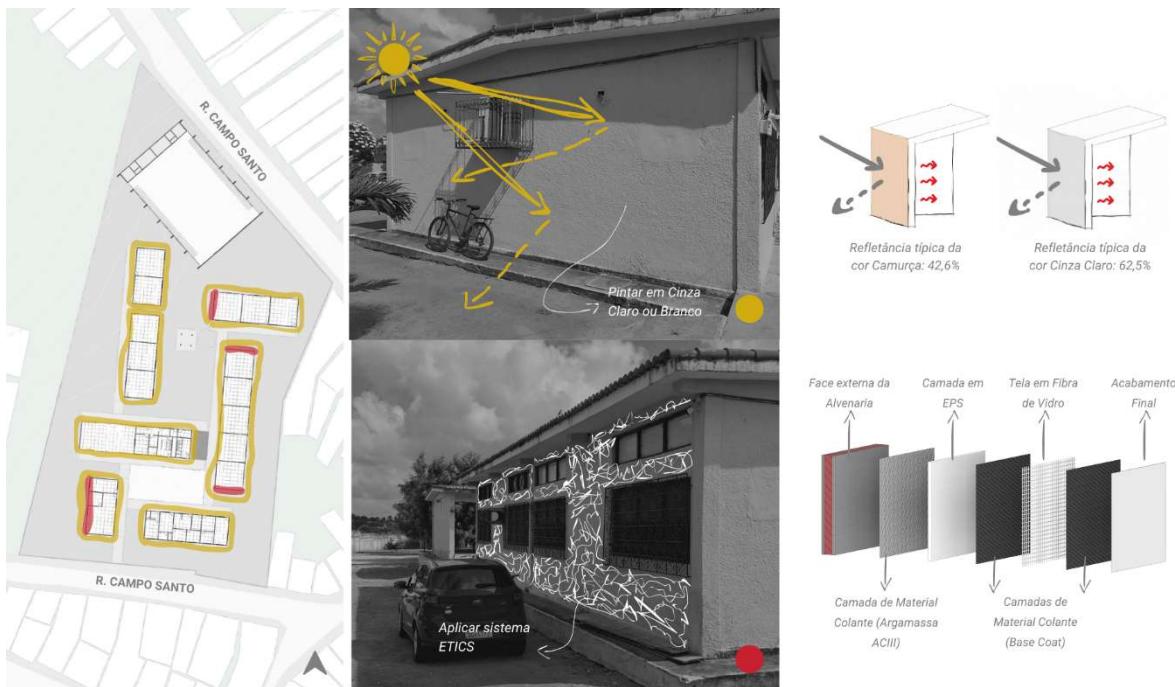


Fonte: Autor, 2025.

Quanto ao tratamento das fachadas, indica-se a substituição da cor atual das paredes externas. Embora a pintura em tom camurça apresente boas propriedades térmicas, com elevada refletância e baixa absorção, recomenda-se sua substituição por um tom de cinza claro, com características térmicas semelhantes. Essa alteração visa complementar o desempenho térmico por meio da psicologia das cores, uma vez que tons alaranjados tendem a ser associados a sensações térmicas mais quentes, enquanto tons acinzentados se relacionam a percepções visuais mais frias. Trata-se, portanto, de uma estratégia complementar, que atua tanto no desempenho quanto na

percepção térmica dos usuários. Adicionalmente, recomenda-se a aplicação do sistema ETICS (External Thermal Insulation Composite System) nas fachadas indicadas na Figura 83, com especial atenção às fachadas oeste, mais expostas à radiação solar no período da tarde.

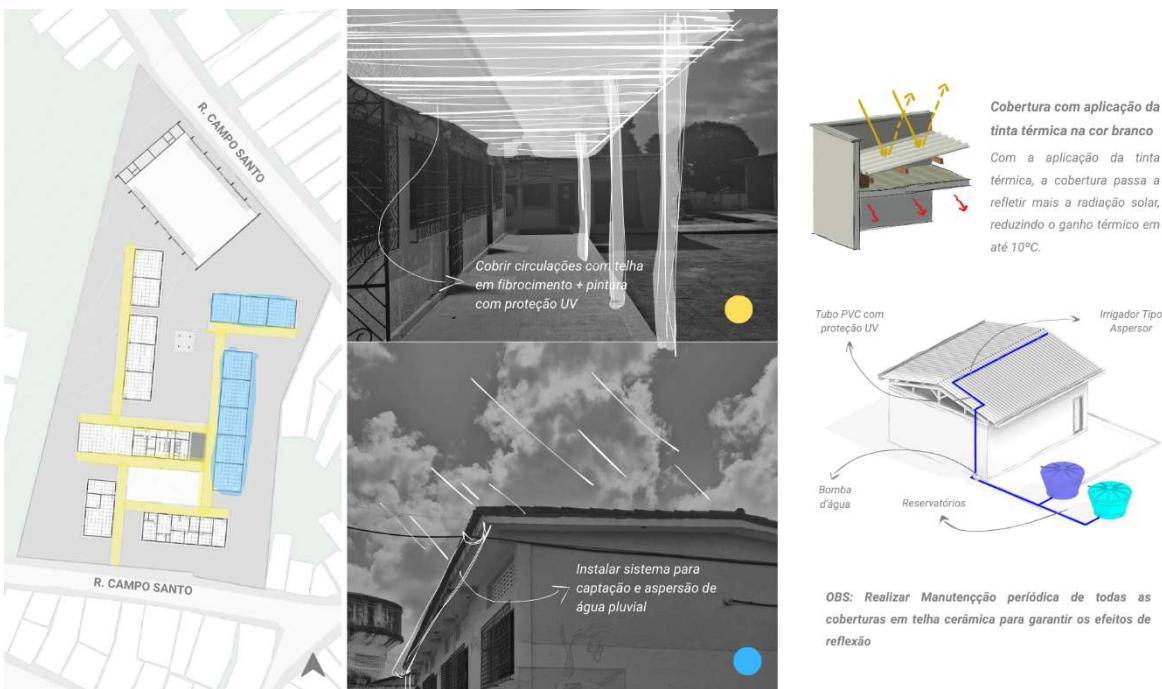
Figura 83 - Estratégias relacionadas ao ganho térmico da envoltória.



Fonte: Autor, 2025.

Para as áreas de circulação, indica-se a instalação de coberturas leves com telhas de fibrocimento, material de fácil manutenção e substituição, associadas à pintura com tinta térmica de alta refletância e proteção UV, preferencialmente na cor branca. Essa solução contribui para a redução da absorção da radiação solar e, consequentemente, do calor transmitido aos ambientes adjacentes. Para os blocos de salas de aula, onde as exigências de conforto térmico são mais rigorosas em função da elevada ocupação, recomenda-se a adoção de estratégias de resfriamento evaporativo das coberturas, utilizando o reaproveitamento de águas pluviais como forma de reduzir a temperatura superficial e os ganhos térmicos.

Figura 84 - Estratégias de cobertura.

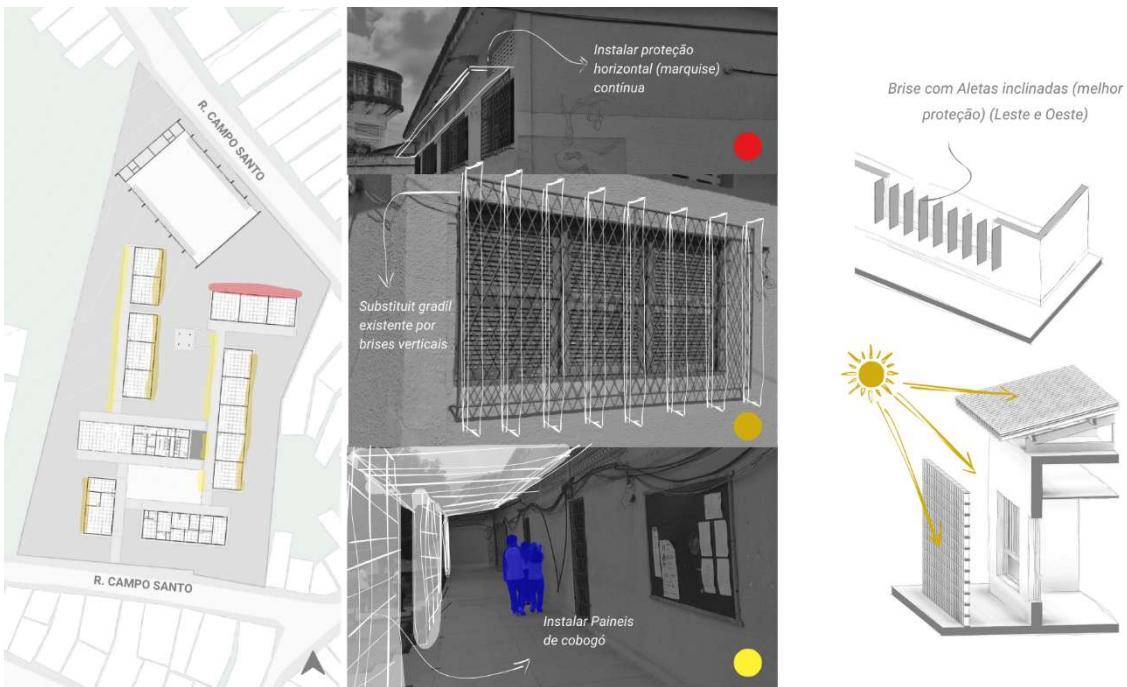


Fonte: Autor, 2025.

O sombreamento das fachadas constitui outra estratégia fundamental. Recomenda-se o uso de proteções horizontais contínuas ou marquises nas fachadas norte e sul; a substituição dos gradis existentes por brises horizontais nas fachadas leste e oeste; e a aplicação de elementos vazados nas circulações, atuando simultaneamente como proteção solar e elemento de segurança, especialmente em função dos desníveis existentes na escola. Essas soluções mostram-se particularmente relevantes nas fachadas oeste, mais suscetíveis à incidência de radiação solar direta (Figura 85).

Além das estratégias propostas, destacam-se ações complementares de manutenção, essenciais para o desempenho térmico da edificação. Recomenda-se a manutenção periódica das coberturas em telha cerâmica, a fim de preservar suas propriedades de refletância, bem como a recuperação e o pleno funcionamento das esquadrias, atualmente parcialmente inoperáveis, condição que compromete a ventilação natural e os processos de perda de calor por convecção no interior das salas de aula.

Figura 85 - Estratégias de Sombreamento.



Fonte: Autor, 2025.

Dessa forma, a aplicação das estratégias no objeto de estudo evidencia que intervenções pontuais, compatíveis com a realidade das edificações escolares existentes, podem promover melhorias significativas no conforto térmico, reforçando a importância de diagnósticos prévios e de soluções passivas integradas ao contexto climático e arquitetônico local.

6.3 – PROCESSO DE ELABORAÇÃO DA CARTILHA

A cartilha intitulada “Conforto Térmico em Edificações Escolares: guia formativo e estratégias bioclimáticas de condicionamento térmico passivo” foi concebida como um material didático de caráter aplicado, voltado à tradução de conceitos técnicos do conforto térmico em orientações práticas e acessíveis à comunidade escolar e aos profissionais envolvidos na qualificação de edificações existentes. Seu desenvolvimento partiu da necessidade de sistematizar conhecimentos fundamentais sobre desempenho térmico e sobre os processos de regulação do calor entre a edificação e o ambiente externo, de modo a subsidiar a

proposição de estratégias bioclimáticas adequadas ao contexto de escolas localizadas no município de Macaíba/RN, inseridas em clima quente e úmido.

A cartilha foi estruturada para atender a um público diverso, incluindo profissionais técnicos – como arquitetos, engenheiros e equipes de manutenção –, bem como gestores escolares, professores e estudantes. Para isso, adota uma linguagem clara e acessível, organizada em duas etapas complementares. A primeira apresenta os conceitos fundamentais do conforto térmico e os principais processos físicos de regulação do calor – radiação, condução, convecção e evaporação –, permitindo a compreensão dos fenômenos que condicionam o desempenho térmico das edificações. A segunda etapa expõe estratégias bioclimáticas passivas aplicáveis às edificações escolares analisadas, estabelecendo uma relação direta entre diagnóstico e proposição de soluções. Essa organização busca evitar a aplicação acrítica de estratégias isoladas, favorecendo decisões mais conscientes e contextualizadas.

A construção estética da cartilha reforça seu caráter didático e formativo. O personagem principal – um manequim articulado de madeira – foi escolhido por sua neutralidade formal e pela capacidade de representar, de maneira simples e intuitiva, situações relacionadas ao conforto térmico e às interações entre o corpo humano e o ambiente construído. As ilustrações do personagem foram desenvolvidas com apoio de ferramentas de inteligência artificial, utilizando o ChatGPT para a geração de imagens a partir de descrições detalhadas, o que possibilitou padronização estética, coerência visual e maior precisão nas representações.

Figura 86 - Personagem principal da cartilha (variações).



Fonte: Chat GPG, a partir de comandos do autor (Autor, 2025).

Com o intuito de facilitar a leitura e a assimilação dos conteúdos, cada processo de regulação térmica foi associado a uma cor específica: amarelo para radiação, vermelho para condução, azul para convecção e verde para evaporação. Essa codificação cromática favorece a associação imediata entre conceitos teóricos e representações gráficas ao longo do material.

Figura 87 - Figura 11 - Processos reguladores.



Fonte: Desenho digital feito com as ferramentas de pincel do Canva (Autor, 2025).

Para garantir clareza visual e evitar sobrecarga informacional, adotou-se uma base gráfica neutra, composta por tons de cinza e branco, que valoriza os elementos informativos e hierarquiza os conteúdos apresentados. As ilustrações utilizam linhas simples e um estilo de desenho livre, facilitando a compreensão dos processos térmicos e das estratégias construtivas mesmo por leitores sem formação técnica específica.

Dessa forma, a cartilha integra diagnóstico ambiental, conteúdo técnico e soluções visuais em um material acessível e didático, capaz de apoiar a tomada de decisões e promover o entendimento sobre conforto térmico e desempenho ambiental em edificações escolares existentes, reforçando seu caráter formativo e aplicável.

07

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo atingiu seus objetivos ao avaliar o conforto térmico em salas de aula de uma edificação escolar inserida em clima quente e úmido, articulando medições ambientais, percepção dos usuários e análise arquitetônica da edificação e de seu entorno. A adoção de uma abordagem integrada permitiu compreender de forma abrangente os fatores que condicionam o desempenho térmico dos ambientes analisados, evidenciando que o desconforto observado resulta da interação entre características construtivas, estratégias arquitetônicas limitadas e condições climáticas locais. Esses resultados subsidiaram a elaboração de uma cartilha com estratégias passivas de requalificação térmica aplicáveis às edificações escolares existentes no município de Macaíba/RN.

As avaliações foram realizadas no mês de setembro, período caracterizado por temperaturas relativamente mais amenas e maiores velocidades médias de vento em relação a outros meses do ano. Ainda assim, os dados evidenciam a predominância de desconforto térmico durante grande parte do período de ocupação das salas, indicando que, mesmo em condições climáticas menos críticas, a combinação entre ventilação natural pouco efetiva, ganhos térmicos elevados pela envoltória e soluções construtivas inadequadas compromete significativamente o conforto térmico dos usuários. Esse achado reforça a necessidade de avaliações sistemáticas do desempenho térmico em edificações escolares, especialmente em contextos climáticos adversos.

Os resultados confirmam a importância de se avaliar o conforto ambiental – com ênfase no conforto térmico – em ambientes escolares, considerando que esses espaços devem favorecer o bem-estar, a atenção e o desempenho cognitivo dos usuários. A análise diagnóstica das condições reais de uso e de desempenho das edificações mostrou-se fundamental para compreender a magnitude dos problemas e orientar intervenções mais eficazes, evitando análises baseadas exclusivamente em prescrições normativas ou em modelos teóricos descontextualizados da realidade local.

Nesse sentido, destaca-se a relevância da utilização de mais de um modelo de predição e avaliação do conforto térmico. Embora o modelo adaptativo da ABNT NBR 16401-2:2024 tenha indicado aceitabilidade térmica em parte das condições monitoradas, tal resultado mostrou-se incompatível com as medições objetivas e, sobretudo, com a percepção térmica dos usuários. As temperaturas internas frequentemente superiores a 28 °C – limite proposto por Araújo (1996) para ambientes escolares em clima quente e úmido –, associadas às baixas velocidades do ar, limitaram as trocas convectivas e intensificaram a sensação de calor e de ar estagnado. Essa divergência evidencia que a avaliação do conforto térmico, especialmente em climas quentes e úmidos, exige uma abordagem multivariada, que combine indicadores físicos, modelos adaptativos e dados subjetivos, reconhecendo a complexidade da experiência térmica.

A pesquisa também evidenciou a necessidade de compreender criticamente a tipologia das edificações escolares que compõem o parque escolar do Rio Grande do Norte. As relações entre forma arquitetônica, materiais construtivos, estratégias passivas (ou sua ausência), implantação e orientação solar exercem influência direta sobre o desempenho térmico. Da mesma forma, o entorno imediato – incluindo presença de vegetação, áreas sombreadas, superfícies expostas e direção dos ventos predominantes – mostrou-se determinante na forma como o edifício interage com o clima e distribui as condições térmicas internamente.

Embora o foco principal do estudo tenha sido o conforto térmico, os resultados indicam a necessidade de que futuras análises considerem de forma integrada as demais dimensões do conforto ambiental, como o conforto lumínico e acústico. A adoção de uma abordagem sistêmica evita soluções pontuais que possam resolver um problema específico à custa do agravamento de outros, contribuindo para ambientes escolares mais saudáveis, eficientes e adequados às práticas pedagógicas.

A elaboração da cartilha constitui um dos principais produtos da pesquisa, ao sistematizar estratégias de requalificação térmica fundamentadas nos mecanismos de regulação do calor – radiação, condução, convecção e evaporação. As recomendações propostas dialogam com as limitações construtivas das escolas existentes e com as condições climáticas de Macaíba/RN, configurando um instrumento técnico e didático para apoiar gestores públicos, projetistas e profissionais da arquitetura e urbanismo. Ressalta-se que a avaliação do conforto térmico deve ser compreendida como ponto de partida para intervenções mais eficientes, garantindo que as estratégias adotadas sejam contextualizadas, tecnicamente embasadas e efetivamente capazes de melhorar o desempenho térmico das edificações.

Como desdobramentos da pesquisa, destacam-se: o aprimoramento e a validação contínua da cartilha, incorporando simulações computacionais, estudos de custo-benefício, ilustrações técnicas, estudos de caso aplicados e protocolos de manutenção; o aprofundamento teórico e metodológico sobre abordagens combinadas de avaliação do conforto térmico em edificações escolares naturalmente

ventiladas em clima quente e úmido, incluindo a definição de indicadores integrados; a ampliação da amostra e do período de monitoramento, contemplando diferentes estações do ano e distintas tipologias escolares; e a integração das dimensões lumínica e acústica em protocolos de diagnóstico e requalificação. Tais avanços podem contribuir para a consolidação de procedimentos de avaliação, diagnóstico e intervenção replicáveis e escaláveis no contexto do estado do Rio Grande do Norte.

Conclui-se, portanto, que a melhoria do conforto térmico em edificações escolares situadas em clima quente e úmido requer soluções integradas que articulem ventilação natural eficaz, sombreamento adequado, otimização da envoltória e compreensão da relação entre edificação e entorno. Ao evidenciar a importância de diagnósticos prévios, do uso combinado de métodos de avaliação e do planejamento de estratégias de requalificação térmica, esta pesquisa contribui para o fortalecimento de práticas projetuais mais conscientes, eficientes e alinhadas às condições climáticas locais, promovendo ambientes escolares mais adequados ao ensino e à aprendizagem.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. L. P. de; DAL' ANNIO, L. B.; NARDI, A. S. L. V.; KLEIN, G. M. B. Avaliação comparativa do conforto térmico resultante da carta bioclimática de Givoni com dados de pesquisa de sensação térmica em residências em Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 774–780. DOI: 10.46421/entac.v17i1.1408.

AQUINO, A. F. S. **Avaliação Térmica em Telhas com Material Reciclado para Serem Utilizadas em Construções Rurais**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2017.

ARAUJO, M. R. de O. **Conforto térmico em salas de aula localizados em clima quente e úmido: uma avaliação do limite inferior da zona de conforto**. 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

ARAUJO, V. M. D. de. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro**. 1996. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Acesso em: 20 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1: Edifícios habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401-2: Instalações de condicionamento de ar – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico**. Rio de Janeiro, 2024.

BATIZ, E. C. et al. Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. **Production**, v. 19, n. 3, p. 477–488, 2009.

BOGO, A. et al. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico**. [S. I.]: [s. n.], 1994. 83 p.

FERNANDES, S. C. (DES)CONFORTO TÉRMICO NA SALA DE AULA: EXPLORANDO SUA RELAÇÃO COM A APRENDIZAGEM. In: ENALIC, 9., 2023. **Anais do IX ENALIC**. [S. I.]: Realize Editora.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

IDEMA (Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte). **Caracterização do Clima do Rio Grande do Norte**. Natal, RN: IDEMA, 2013.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. p. 1-34. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

KOWALTOWSKI, D. **Arquitetura Escolar**: o projeto do ambiente de ensino. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações**. 7. ed. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.

LAZZAROTTO, N. **Adequação do modelo PMV na avaliação do conforto térmico de crianças do ensino fundamental de Ijuí-RS**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2007.

LIGUORI, I. N.; LABAKI, L. C. Avaliação do conforto térmico em ambiente escolar: comparações entre o modelo adaptativo e respostas de sensação e preferência térmica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.895.

MACAÍBA (Município). **Plano Diretor de Macaíba**. Macaíba, RN: Prefeitura Municipal de Macaíba, 2021.

MAGOGA, P. M.; MURARO, D. N. A escola pública e a sociedade democrática: a contribuição de Anísio Teixeira. **Educação & Sociedade**, v. 41, e236819, 2020.

MEDEIROS, C. S. de. **Avaliação do conforto térmico em edificações escolares no semiárido potiguar**: estudo aplicado em escolas do ensino médio na cidade de Caicó/RN. 2019. 162f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

MENDES, V. F. et al. Análise de desempenho térmico de edificações: Uma revisão narrativa incluindo a influência dos fechamentos. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 5., 2023. **Anais [...]**. [S. I.], 2023.

METEOBLUE. **Clima Modelado Histórico para Macaíba**. 2024. Disponível em: https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/maca%c3%adb_a_brasil_3396048. Acesso em: 25 mar. 2025.

NEGREIROS, B. de A. **Análise de métodos de predição de conforto térmico de habitação em clima quente-úmido com condicionamento passivo.** 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Conforto no Ambiente Construído; Forma Urbana e Habitação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

NOVAIS, J. W. Z. et al. Comparação do Desempenho Térmico de Painéis em EPS como Alternativa aos Tijolos Cerâmicos no Conforto Térmico de Residências em Cuiabá-MT. **UNOPAR Científica. Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 13, n. 1, p. 39-43, nov. 2014.

ORNSTEIN, S. W.; ROMÉRO, M. **Avaliação pós-ocupação (APO) do ambiente construído.** São Paulo: Studio Nobel; Editora USP, 1992.

PACHECO, G. H. S. **Determinação de recomendações bioclimáticas para habitação de interesse social de quatro climas do Rio Grande do Norte.** 2016. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

PAGNOSSIN, E. M.; BURIOL, G. A.; GRACIOLLI, M. A. Influência dos elementos meteorológicos no conforto térmico humano: bases biofísicas. **Disciplinarum Scientia. Saúde**, v. 2, n. 1, p. 149–161, 2016.

PARK, R. J.; BEHRER, A. P.; GOODMAN, J. Learning is inhibited by heat exposure, both internationally and within the United States. **Nature Human Behaviour**, v. 5, n. 1, p. 19-27, 2021.

RIBEIRO, M. S.; MONTE, M. C. do. O DESCONFORTO TÉRMICO NAS “SAUNAS DE AULA” E O PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM: UMA REFLEXÃO SOBRE A SALA TEMÁTICA DE GEOGRAFIA SITUADA EM UMA ESCOLA PÚBLICA DO ESTADO DE RORAIMA. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 1140–1155, 2025. DOI: 10.51891/rease.v11i5.19042.

ROMERO, M. A. B. **A arquitetura bioclimática para o desenho urbano.** Brasília: Universidade de Brasília, 2013.

SILVEIRA, G. W. P. da et al. Conforto térmico em salas de aula: estado da arte das pesquisas nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 1038–1046. DOI: 10.46421/entac.v17i1.1444.

SOUZA, J. F. de; BRASILEIRO, M. C.; NODA, L.; LEDER, S. M. Estudo de conforto térmico em salas de aula ventiladas naturalmente no clima quente e úmido. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019. **Anais [...]**. [S. l.], 2019. p. 1241–1250.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P. The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on performance of school work by children. **Proceedings of Indoor Air I**, v. 1, p. 368-72, 2005.

Wahrlich, V., & Anjos, L. A. dos .. (2001). Aspectos históricos e metodológicos da medição e estimativa da taxa metabólica basal: uma revisão da literatura. *Cadernos De Saúde Pública*, 17(4), 801–817. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2001000400015>

LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL – UFRN. *Sombreamento*. Natal: UFRN, 2023. Disponível em: <arquivo fornecido em aula>.

WEATHER SPARK. *Clima característico em Macaíba, Rio Grande do Norte, Brasil durante o ano*. 2025. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/31428/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Maca%C3%ADba-Rio-Grande-do-Norte-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 13 set. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Atlas Brasileiro de Energia Solar – Atlas Solarimétrico do Rio Grande do Norte*. São José dos Campos: LABREN/INPE, 2017. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_RN.html. Acesso em: 13 set. 2025.

LIGA DE ENSINO DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO UNIVERSITÁRIO DO RIO GRANDE DO NORTE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Trabalho de Conclusão de Curso

Graduando: João Victor da Silva Costa Souza

Orientação: Camila Furukava

Natal/RN

Novembro, 2025



CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES ESCOLARES EXISTENTES

Guia formativo e Estratégias bioclimáticas de condicionamento térmico passivo para requalificação térmica em edificações escolares construídas em clima quente e úmido

***Este material é um convite para observar,
compreender e transformar.***

Compreender os processos reguladores, reconhecer os problemas e aplicar soluções adequadas permite transformar a relação entre clima, arquitetura e bem-estar nas escolas, criando ambientes mais equilibrados e favoráveis ao ensino e à aprendizagem.

APRESENTAÇÃO

Esta cartilha apresenta orientações práticas e acessíveis para melhorar o conforto térmico em edificações escolares de clima quente e úmido. Baseada nas condições de Macaíba (RN), explica de forma didática como o calor se comporta nos edifícios e aborda os principais processos que influenciam a sensação térmica – radiação, condução e evaporação.

A partir desses conceitos, o material reúne estratégias de condicionamento térmico passivo que podem ser aplicadas sem grandes intervenções em escolas já existentes. Entre elas, sombreamento, redução do ganho térmico em paredes e coberturas, otimização da ventilação natural e uso de elementos vazados e vegetação. As recomendações são apresentadas de forma objetiva, facilitando sua aplicação por profissionais e pela comunidade escolar.

ÍNDICE

1. **APRESENTAÇÃO** - Página 02
2. **PARA QUEM?** - Página 04
3. **ONDE APLICAR?** - Página 05
4. **O QUE É O CONFORTO TÉRMICO?** - Página 06
5. **OBJETIVOS DA CARTILHA** - Página 08
6. **GUIA DE LEITURA** - Página 09
7. **GLOSSÁRIO** - Página 10
8. **PROCESSOS REGULADORES** - Página 14
9. **Radiação** - Página 16
10. **Condução** - Página 22
11. **Convecção** - Página 26
12. **Evaporação** - Página 32
13. **ESTRATÉGIAS** - Página 35
14. **Estratégias de Sombreamento** - Página 37
15. **Reduzindo o ganho térmico em coberturas** - Página 44
16. **Reduzindo o ganho térmico das paredes** - Página 51
17. **Usando o Cobogó** - Página 57
18. **REFERÊNCIAS** - Página 62

PARA QUEM?

Esta cartilha foi elaborada para orientar profissionais e usuários que atuam no planejamento, uso e manutenção de edificações escolares. O conteúdo apresenta soluções práticas e acessíveis, permitindo que a comunidade escolar participe de forma ativa das decisões que influenciam o conforto térmico.



Arquitetos e Engenheiros

Transforme escolas: Use este guia para um retrofit bioclimático eficiente.

Gestores de Escola

Decisão estratégica: Planeje intervenções inteligentes e melhore o conforto ambiental da sua escola.

Equipes de Manutenção

Otimize sem quebrar: Encontre soluções práticas e de baixo custo para o desempenho térmico da edificação.

Professores, Estudantes e Comunidade Escolar

Conhecimento para o bem-estar: Entenda a relação entre o clima e conforto térmico na sua sala de aula.

Estudantes de Arquitetura

Simplifique a teoria: Compreenda os conceitos de desempenho térmico e a relação clima-arquitetura.

ONDE APLICAR?

O conteúdo desta cartilha foi desenvolvido com base nas condições climáticas de Macaíba (RN), localizada na Zona Bioclimática 5A, de clima quente e úmido (ABNT NBR 15220-3, 2024). As recomendações também são adequadas para municípios vizinhos (como Natal e Parnamirim) e para outras regiões que apresentem características semelhantes dos fatores e elementos climáticos, como por exemplo, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e direção e velocidade dos ventos.



Brasil



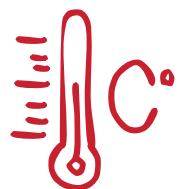
Rio Grande do Norte



Macaíba

Clima Quente e Úmido

A Zona Bioclimática 5A possui clima quente e úmido, com altas temperaturas do ar e forte insolação, exigindo estratégias de ventilação e sombreamento para garantir conforto térmico nas edificações.



Altas
temperaturas do ar



Forte
Irradiação solar



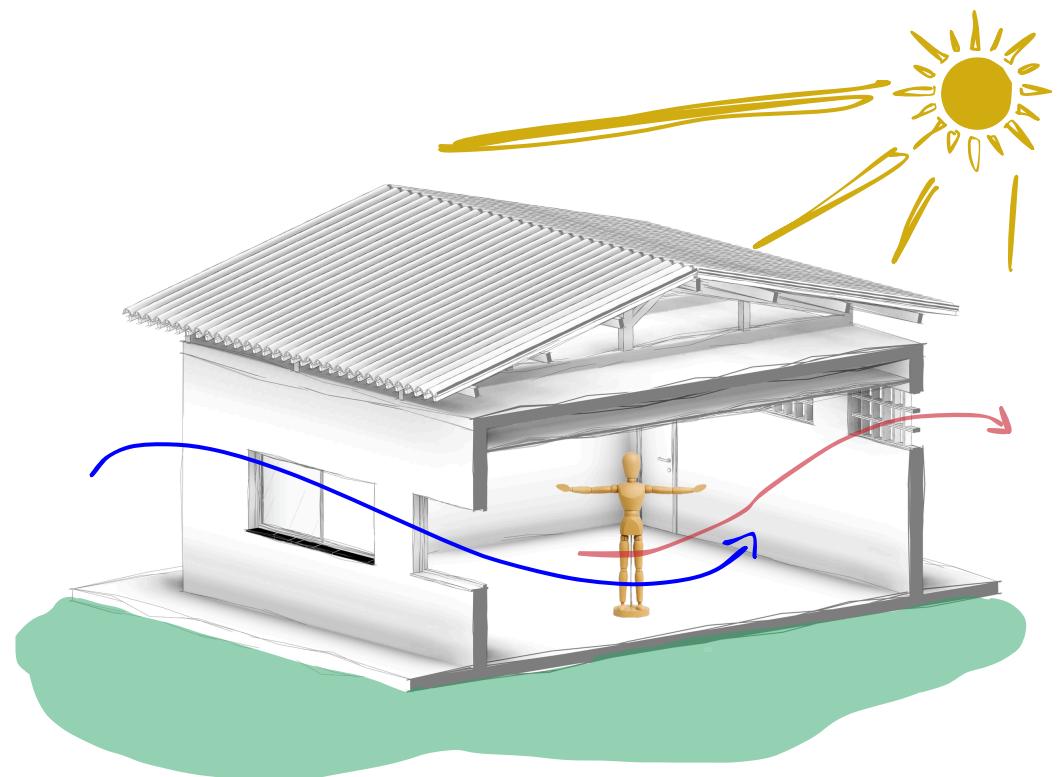
Alta umidade
relativa do ar



IMPORTANTE: As diretrizes apresentadas nesse material são voltadas para edificações escolares existentes.

O QUE É O CONFORTO TÉRMICO?

Simplificadamente, o conforto térmico é a sensação de bem-estar experimentada quando o corpo não percebe excesso de calor ou de frio. Nas edificações, essa condição depende de fatores como temperatura do ar, umidade relativa do ar, ventilação, radiação solar e das características dos materiais, que influenciam diretamente quão confortável o ambiente interno se mantém ao longo do dia.



Por Que o Conforto Térmico é Essencial nas Escolas?

No clima quente e úmido, a alta temperatura, a forte insolação, a umidade elevada e a baixa circulação de ar tornam mais difícil o resfriamento natural do corpo. Isso intensifica o cansaço, reduz a concentração e compromete a experiência de ensino-aprendizagem.



Efeito no Corpo e na Mente

O calor deixa as pessoas cansadas, irritadas e com dificuldade de prestar atenção. Também aumenta a sensação de mal-estar, podendo causar dor de cabeça e sonolência.

Efeito no Processo Pedagógico

Salas muito quentes atrapalham a concentração dos alunos e o desempenho dos professores, reduzindo o ritmo das atividades e o dinamismo da aula.



Ambientes de ensino-aprendizagem com bom desempenho térmico proporcionam:

Maior concentração.

01

Ambientes mais frescos ajudam os estudantes a manter o foco por mais tempo.

Menor fadiga e irritabilidade.

02

Menos calor reduz o cansaço e o desconforto emocional.

Mais participação e disposição.

03

O bem-estar térmico incentiva o envolvimento nas atividades.

Melhor desempenho cognitivo.

04

Temperaturas adequadas favorecem memória, atenção e raciocínio.

Permanência mais saudável e produtiva.

05

Condições térmicas adequadas tornam a rotina escolar mais confortável e eficaz.

OBJETIVOS DA CARTILHA

01

Melhorar o conforto térmico

Apresentar estratégias bioclimáticas passivas para requalificação térmica de edificações escolares existentes.

02

Usar melhor os recursos naturais

Aproveitar ventilação, sombra e vegetação para diminuir a dependência de climatização artificial.

03

Capacitar a comunidade escolar

Oferecer orientação acessível para gestores, professores e profissionais de projeto e manutenção predial.

04

Contribuir para o ensino-aprendizagem

Ambientes confortáveis favorecem concentração, bem-estar e melhor desempenho escolar.

Conexão com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Ao incentivar o uso de estratégias passivas, a cartilha contribui para o desenvolvimento sustentável (ODS 04 e 13).

Otimizar o desempenho térmico de escolas existentes reduz a necessidade de condicionamento ativo, diminuindo o consumo de energia. O melhor desempenho da edificação aumenta o conforto dos usuários e cria condições superiores nos ambientes de ensino.



GUIA DE LEITURA

Esta é uma sugestão de leitura, organizada para acompanhar o processo de aprendizagem e aplicação das estratégias apresentadas na cartilha.

01 *Processos Reguladores*

Compreenda como o calor se comporta na edificação e como os processos de radiação, condução, convecção e evaporação influenciam o conforto térmico. Esta etapa oferece a base necessária para interpretar corretamente as estratégias.

02 *Estratégias*

Aplique soluções práticas para melhorar o desempenho térmico das salas de aula, como sombreamento, redução do ganho térmico em paredes e coberturas, ventilação natural e uso de elementos vazados e vegetação. As recomendações mostram onde aplicar cada solução e qual processo regulador está envolvido.

Por que entender os processos reguladores?

Antes de aplicar as estratégias de conforto térmico, é importante compreender como o calor entra, circula e se acumula na edificação. Esses processos ajudam a explicar por que alguns ambientes ficam mais quentes, como os materiais influenciam a temperatura e de que forma a ventilação natural e o sombreamento podem melhorar rapidamente a sensação térmica.

GLOSSÁRIO

Este glossário foi elaborado para facilitar a compreensão dos conceitos técnicos utilizados ao longo desta cartilha. Ele apresenta explicações simples e diretas sobre temas relacionados ao **conforto térmico, desempenho térmico** das edificações e **estratégias bioclimáticas**.



Dica: Sempre que surgir alguma dúvida durante a leitura, volte ao glossário para revisar os conceitos. Isso tornará o conteúdo mais claro e contribuirá para uma melhor compreensão das soluções propostas.

Introdução aos conceitos / **GLOSSÁRIO**

Absorção Térmica

Capacidade de um material de absorver o calor que recebe do sol ou do ambiente.

Albedo

Proporção de radiação solar refletida por uma superfície. Superfícies claras têm maior albedo e aquecem menos.

Brise / Brise-Soleil

Elemento de sombreamento que reduz a entrada de sol direto sem bloquear a ventilação.

Capacidade Térmica

Habilidade de um material de armazenar calor. Materiais com alta capacidade térmica demoram mais para esquentar e esfriar.

Cobogó

Elemento vazado que permite a passagem de ar e entrada de luz difusa, contribuindo para ventilação e sombreamento.

Condicionamento Térmico Passivo

Técnicas que não usam energia elétrica para refrescar o ambiente, como ventilação natural, sombreamento e vegetação.

Condicionamento Térmico Ativo

Uso de equipamentos que consomem energia, como ar-condicionado e ventiladores.

Condução Térmica

Passagem do calor através de materiais sólidos, como paredes e coberturas.

Condutividade Térmica

Capacidade de um material de permitir a passagem de calor. Materiais com alta condutividade deixam o calor atravessar com mais facilidade.

Conforto Térmico

Sensação de bem-estar quando o corpo humano não sente calor excessivo nem frio.

Convecção

Movimento do ar causado por diferenças de temperatura ou pressão, impulsionando o transporte de calor.

Desempenho Térmico

Capacidade da edificação de manter temperaturas internas mais agradáveis, reduzindo ganhos e perdas excessivas de calor.

Diferença de Pressão

Variação entre áreas com pressões diferentes (positiva e negativa), fazendo o ar circular naturalmente.

Diferença de Temperatura

Variação entre regiões mais quentes e mais frias, fazendo o calor se mover da área quente para a fria.

Eficiência Energética

Uso inteligente da energia para manter o conforto, com menos desperdício.

Eficiência Térmica

Capacidade da edificação de reduzir seu aquecimento interno por meio da arquitetura e dos materiais.

Sucção do Vento

Aceleração do vento ao passar por aberturas estreitas, aumentando a ventilação interna.

Envoltória

Partes externas da edificação (paredes, janelas, portas e coberturas) que influenciam diretamente o comportamento térmico.

Estratégias Bioclimáticas

Soluções arquitetônicas que utilizam as condições climáticas locais para melhorar o conforto e reduzir o consumo de energia.

Evaporação

Processo de resfriamento pelo qual a água se transforma em vapor.

Evapotranspiração

Perda de água do solo e das plantas, contribuindo para o resfriamento natural do entorno.

Ganho Térmico

Calor que entra na edificação por radiação solar, superfícies aquecidas ou ar quente.

Ilhas de Calor

Aquecimento excessivo em áreas urbanas causado pelo excesso de pavimentação, pouca vegetação e materiais que acumulam calor.

Inércia Térmica

Capacidade da edificação de manter temperaturas estáveis ao longo do dia, evitando variações bruscas.

Isolamento Térmico

Uso de materiais que reduzem a passagem de calor, tornando os ambientes mais confortáveis.

Massa Térmica

Quantidade de material capaz de armazenar calor. Quanto maior a massa térmica, mais lenta é a variação de temperatura.

Materiais Opacos

Materiais que não permitem a passagem de luz, como concreto, cerâmica e madeira.

Materiais Translúcidos

Materiais que deixam a radiação solar passar, mas não permitem visão nítida, como vidro fosco ou policarbonato.

Materiais Transparentes

Materiais que deixam a radiação solar passar como vidro ou policarbonato.

Microclima

Condições ambientais específicas de um pequeno espaço, influenciadas por sombreamento, materiais e vegetação.

Porosidade

Presença de pequenos espaços vazios em um material, que geralmente melhora o isolamento térmico.

Pressão Negativa

Situação em que o ar é puxado para fora do ambiente, favorecendo a saída de ar quente.

Pressão Positiva

Situação em que o ar é empurrado para dentro do ambiente, facilitando a entrada de ar fresco.

Processos Reguladores (Processos Termorreguladores)

Mecanismos naturais que explicam como o calor entra, sai e circula no edifício: radiação, condução, convecção e evaporação.

Radiação Solar

Energia térmica do sol que aquece superfícies expostas.

Refletância Térmica

Capacidade de uma superfície de refletir calor e luz, reduzindo seu aquecimento.

Resistência Térmica

Medida da dificuldade que um material oferece para a passagem de calor.

Retrofit

Processo de modernização ou requalificação de uma edificação já existente para melhorar seu desempenho.

Sombreamento

Elementos naturais ou construídos que bloqueiam ou reduzem a radiação solar direta.

Sombreamento Vegetal

Sombra produzida por árvores e vegetação, ajudando a reduzir o calor e melhorar o microclima.

Superfícies

Paredes, pisos, tetos e coberturas que recebem, absorvem ou refletem calor.

Trajetória Solar

Caminho percorrido pelo sol no céu ao longo do dia e das estações.

Transmitância Térmica

Quantidade de calor que atravessa uma superfície. Quanto maior, mais calor entra.

Trocas Térmicas

Transferência de calor entre superfícies, ar e corpo humano.

Umidade Relativa do Ar

Quantidade de vapor de água presente no ar, que interfere na sensação de calor e no funcionamento da evaporação.

Vazios de Ventilação / Ventilação Unilateral

Ventilação que ocorre por aberturas de um único lado, menos eficiente que a ventilação cruzada.

Vedações

Elementos como paredes, portas e janelas que fecham e protegem os ambientes internos.

Ventilação Cruzada

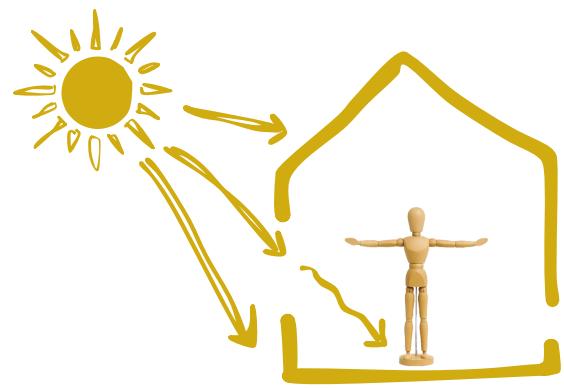
Entrada de ar por uma abertura e saída por outra em lado oposto, promovendo ventilação eficiente.

Ventilação Predominante

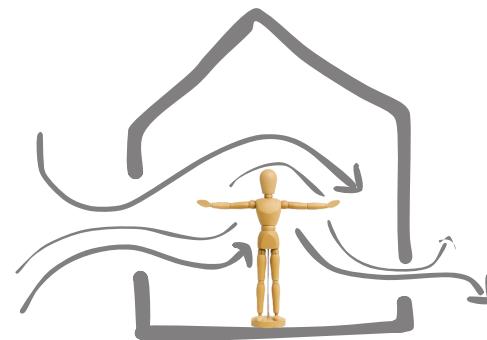
Direção dos ventos mais frequente na região, usada como referência para posicionar aberturas.

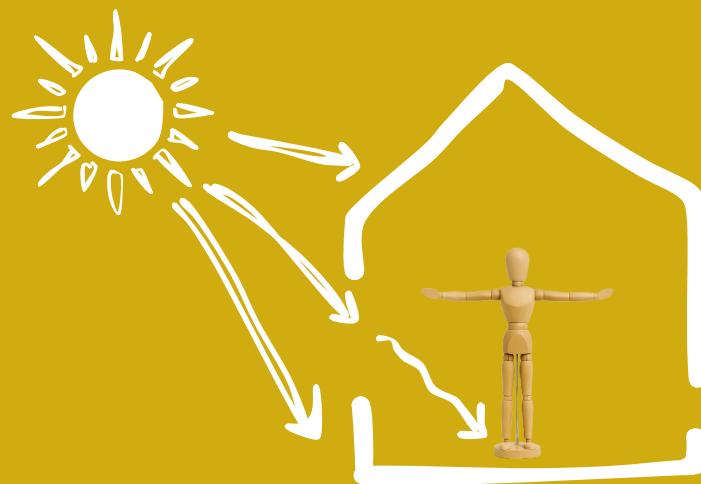
PROCESSOS REGULADORES

O que define o desempenho térmico das edificações? A resposta está nos "Processos Reguladores"



RADIAÇÃO



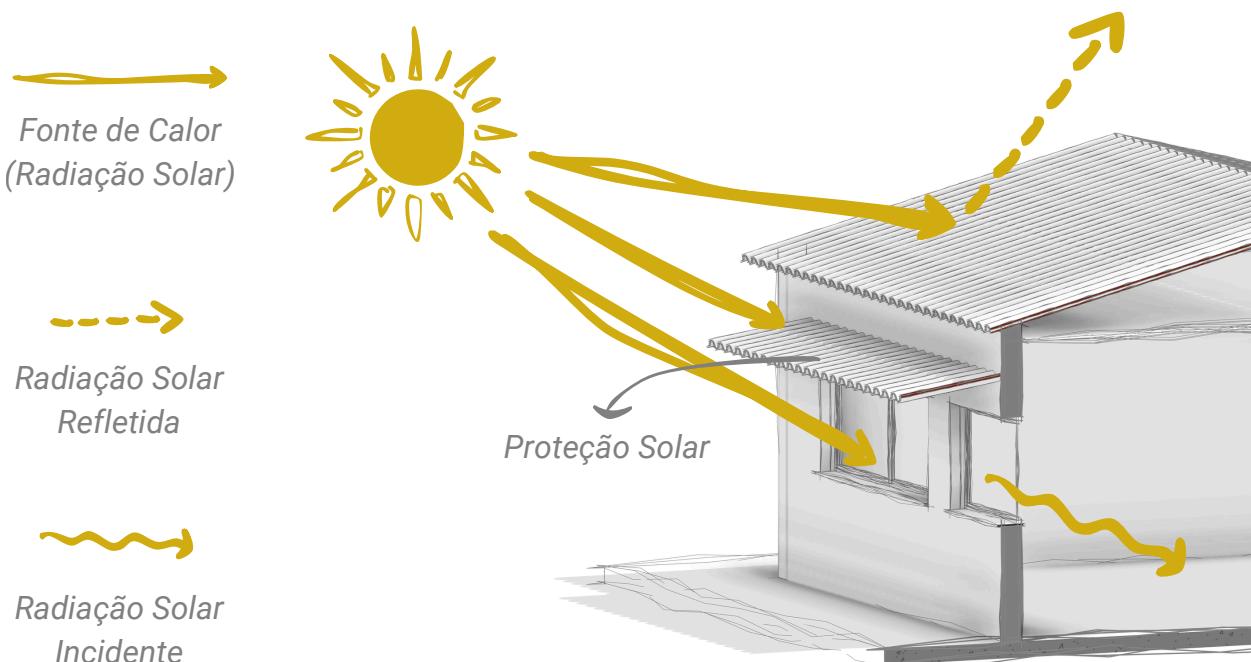


RADIAÇÃO

Energia térmica (Calor) enviada pelo sol que aquece as superfícies expostas.

COMO FUNCIONA?

Quando a radiação solar incide nas superfícies externas de uma edificação (paredes, coberturas e pisos), parte dessa energia é **absorvida**, aquecendo esses elementos. Em superfícies translúcidas, como o vidro, uma parcela significativa da energia solar **atravessa** diretamente para o interior, aquecendo os ambientes. A parcela da radiação que não é absorvida pode ser transmitida ou **refletida**. Quanto maior a capacidade de refletir a radiação, menor será a absorção de calor e, consequentemente, o ganho térmico da edificação.





Para entender melhor...

Assim como usamos boné, guarda-sol ou procuramos sombra de uma árvore em dias quentes para nos proteger da radiação solar, as edificações também precisam de elementos que favoreçam seu desempenho térmico. Recursos arquitetônicos (como beirais e brises) e elementos externos de paisagismo que funcionam como barreiras solares, ajudam a evitar que a radiação incida diretamente sobre as superfícies.

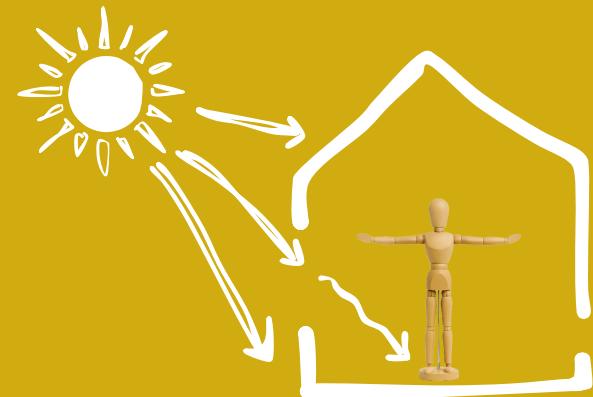
Você Sabia?

A Irradiação Solar Global Diária em meses quentes pode atingir picos de mais de 5.800wh/h² (watt-hora por metro quadrado). Essa energia é uma carga térmica significativa que incide sobre a envoltória da edificação.



X 102

Para ilustrar, essa energia equivale ao calor emitido por cerca de 102 lâmpadas incandescentes de 60W acesas durante uma hora, concentrada em 1m².



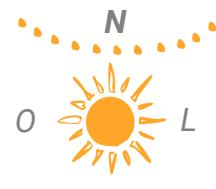
Bloquear e refletir a Radiação solar ajuda a alcançar o conforto térmico.

Trajetória Solar

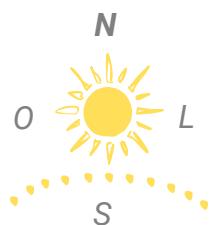
A posição do Sol no céu muda ao longo do ano, alterando a forma como a **radiação solar** incide nas edificações. **Compreender esses caminhos é essencial para planejar estratégias de sombreamento e proteção solar.**

No Universo de aplicação desta cartilha

No Nordeste brasileiro, o Sol percorre trajetórias mais altas e diretas ao longo do ano, fazendo com que a radiação chegue com maior intensidade.



Entre os meses de Abril e Agosto, o Sol faz um percurso mais ao **Norte** da edificação.



Entre Outubro e Fevereiro, o Sol faz um percurso mais ao **Sul** da edificação.

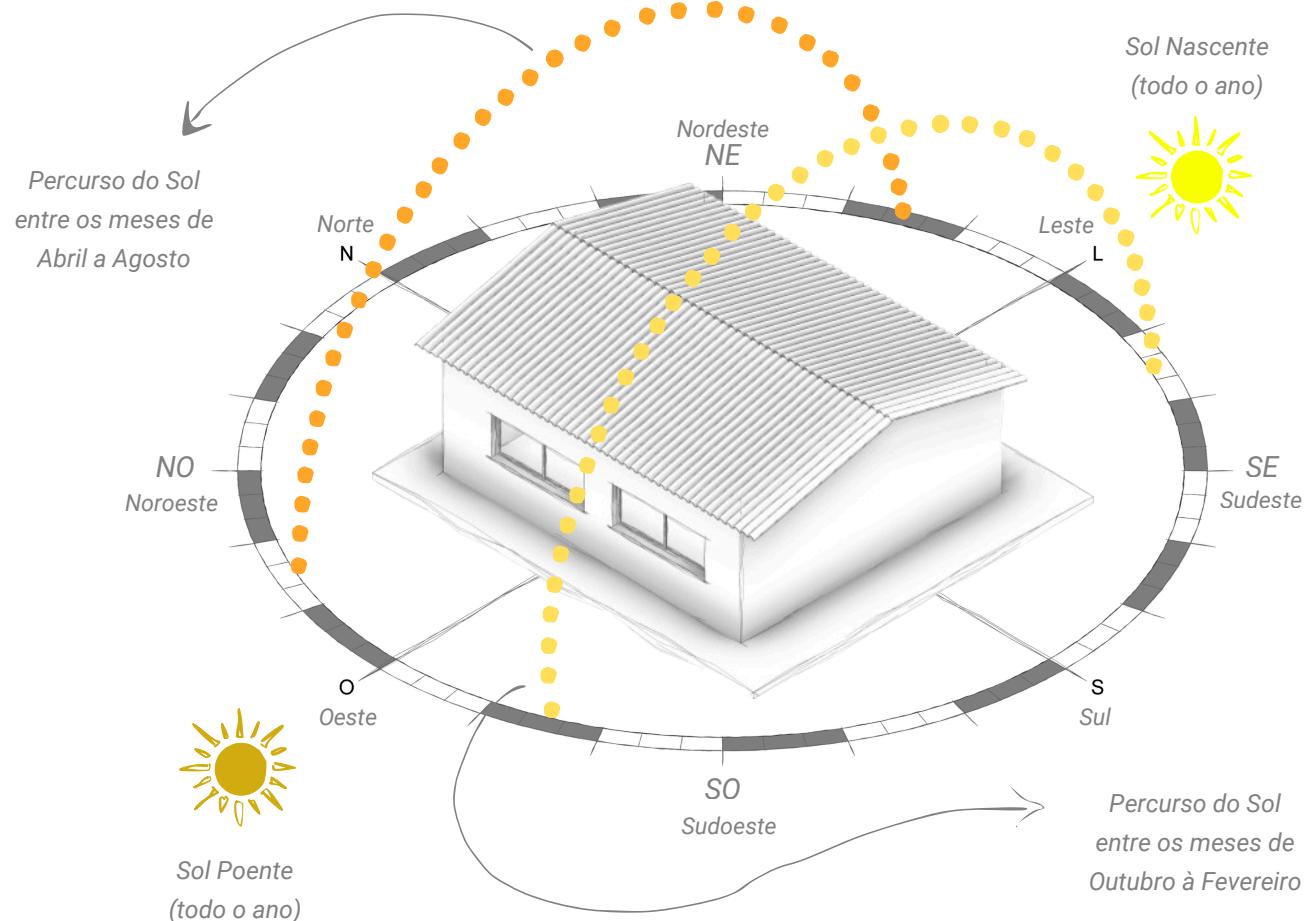
Sol mais alto nos meses de Março e Setembro

Nos meses de Março e Setembro o Sol faz um percurso em ângulo mais alto, sendo no mês de Março com uma leve inclinação para Sul e no mês de Setembro com uma leve inclinação para Norte.

Percorso do Sol durante o período de 1 ano



Esquema prático do percurso solar no universo de aplicação da cartilha



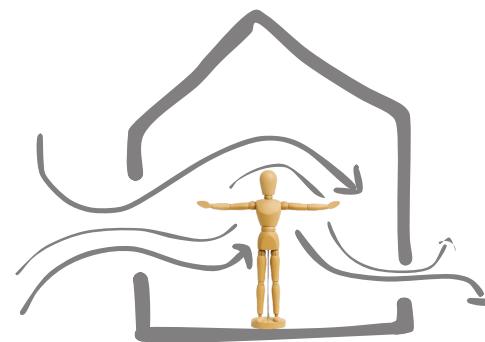
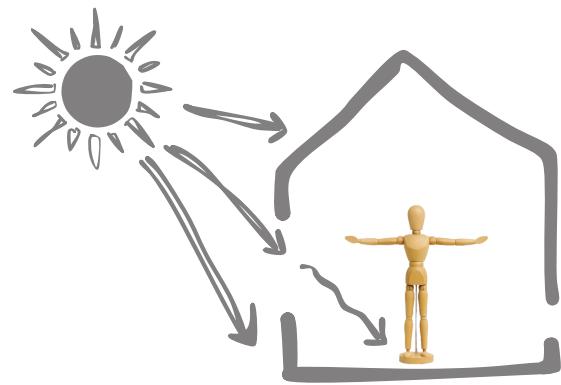
Sobre a trajetória solar é importante saber que:

1 - O Sol sempre irá nascer na direção Leste e se por na direção Oeste.

2 - Entre os meses de Abril à Agosto o Sol atingirá às fachadas mais ao Norte: Leste e Nordeste pela manhã e Oeste e Noroeste pela tarde.

3 - Nos dias de Março e de Setembro, o Sol estará mais alto, atingindo principalmente às fachadas Leste e Oeste.

4 - Entre os meses de Outubro à Fevereiro o Sol atingirá às fachadas mais ao Sul: Leste e Sudeste pela manhã e Oeste e Noroeste pela tarde.



CONDUÇÃO



CONDUÇÃO

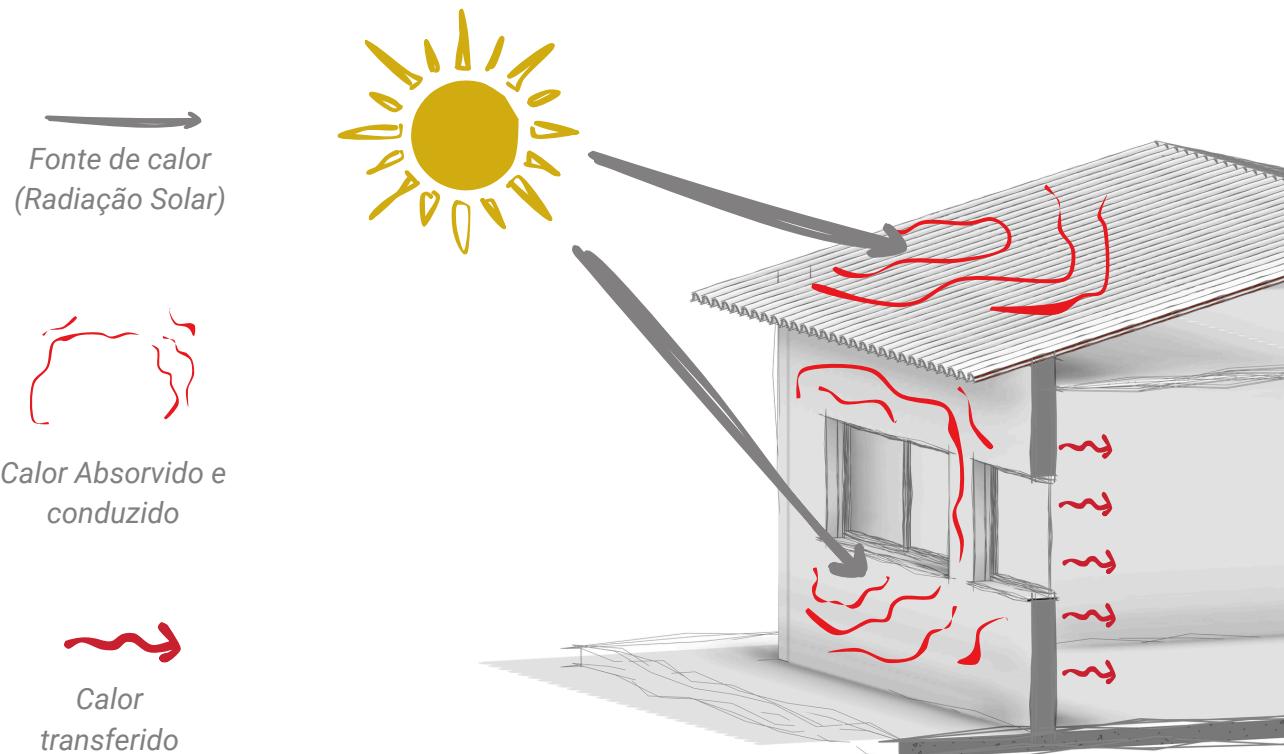
Passagem do calor através dos materiais sólidos, como paredes e coberturas.

COMO FUNCIONA?

O processo de condução térmica ocorre através da troca de calor por meio do contato entre superfícies ou partes de um mesmo material.

Os materiais da envoltória recebem o calor da radiação solar, onde ele é **absorvido**, **conduzido** e **transmitido** para o ambiente interno da edificação.

O ganho térmico por condução depende, portanto, da capacidade dos materiais da envoltória da edificação de conduzir ou resistir à passagem de calor.





Para entender melhor...

O processo de condução pode ser comparado a uma garrafa térmica: o isolamento térmico presente no material da garrafa impede a troca rápida de calor entre o interior e o exterior. Da mesma forma, uma parede com baixa condutividade e alta resistência térmica reduz a passagem de calor, mantendo o ambiente interno mais confortável.

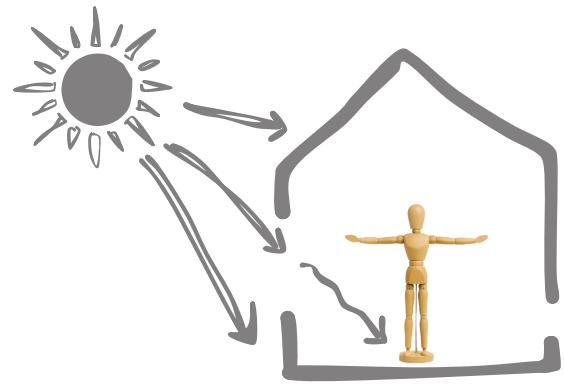
No contexto de aplicação desta cartilha:

No universo de aplicação desta cartilha, as edificações escolares, em geral, possuem paredes em blocos de concreto ou tijolo cerâmico, e telhado de fibrocimento ou telha cerâmica. Construções que usam o material cerâmico costumam ser melhores para manter a temperatura agradável dentro da sala, se comparadas às que usam o bloco de concreto com telhado de fibrocimento.

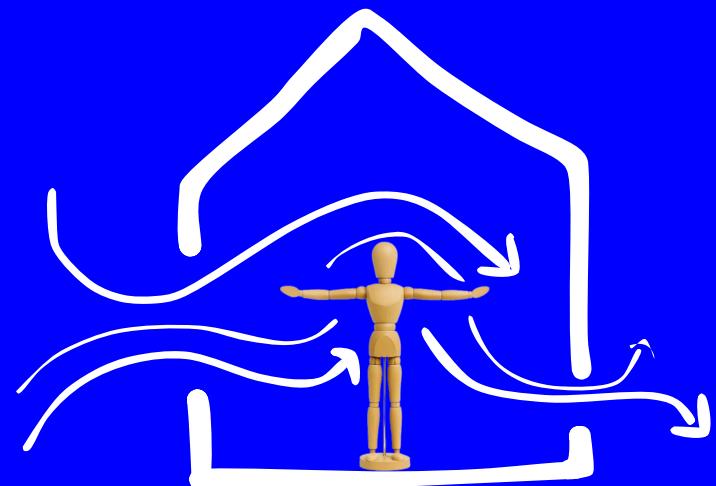
Embora haja outros sistemas para melhorar o conforto térmico, esta cartilha foca nos mais comuns nas escolas, oferecendo orientações práticas aplicáveis a partir das condições existentes.



O conforto térmico começa na escolha dos materiais!



CONVEÇÃO



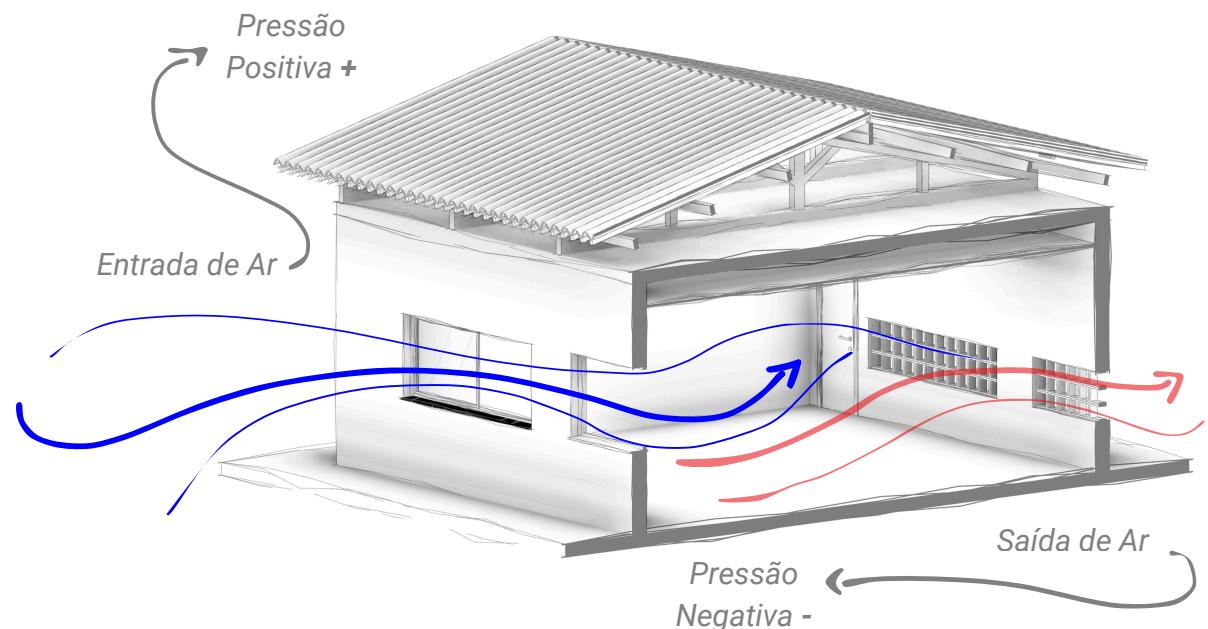
CONVEÇÃO

Movimento do calor pelo ar em circulação, criando correntes que espalham o calor nos ambientes.

COMO FUNCIONA?

A convecção é o processo de transferência de calor que ocorre pelo movimento do ar (ou de outros fluidos). O ar quente, por ser menos denso, tende a subir, enquanto o ar frio, mais denso, desce, formando correntes de circulação do ar.

Nas edificações, esse movimento do ar pode gerar ganhos ou perdas de calor e contribuir para redistribuição térmica nos ambientes internos. O controle da convecção está diretamente relacionado à **ventilação**, essencial para remover o ar quente acumulado e permitir a entrada de ar mais fresco, promovendo conforto térmico no ambiente interno.



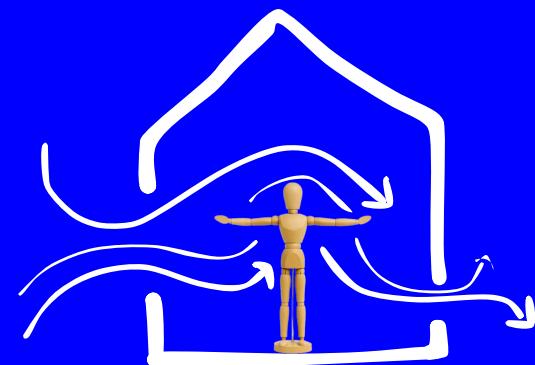
Para entender melhor...



Quando sentimos calor, intuitivamente e culturalmente, procuramos locais ventilados ou nos abanamos com objetos como leques que provocam o movimento do ar, esse gesto ajuda o corpo a se resfriar. O mesmo princípio vale para as edificações, ao abrirmos as janelas para ventilar o ambiente.

Aprofundando o tema:

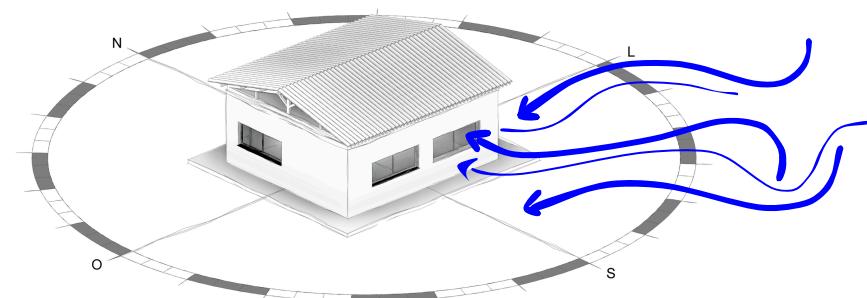
Em climas quentes e úmidos, a **convecção** é essencial para regular a temperatura, tanto para o edifício quanto para o conforto do usuário. Como a alta umidade dificulta a evaporação do suor (Principal mecanismo de perda de calor do corpo humano), é necessário intensificar a circulação de ar para favorecer o resfriamento do corpo e manter o conforto térmico.



Quanto maior a circulação do ar, maior a troca de calor com o ambiente, melhorando o conforto térmico.

No contexto de aplicação desta cartilha:

A ventilação predomina no quadrante Leste - Sul, com maiores concentrações e velocidade na direção Sudeste.



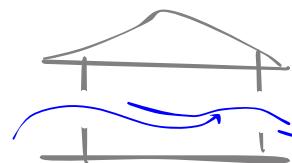
Entre os processos de regulação térmica, as estratégias por convecção são mais difíceis de aplicar em edificações existentes, pois alterar ou criar aberturas pode ser caro e ineficiente se feito sem critério. Por isso, é essencial compreender os princípios que garantem a eficiência da ventilação cruzada.



Princípios de eficiência da ventilação cruzada

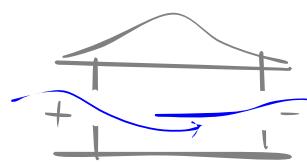
1 - Aberturas em lados opostos

A ventilação cruzada é favorecida pela presença de aberturas opostas ou adjacentes, alinhadas aos ventos predominantes, permitindo que o ar atravesse pelo ambiente.



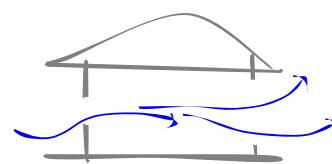
2 - Diferença de pressão

Superfícies voltadas para entrada do ar exercem pressão positiva (+), enquanto superfícies opostas apresentam pressão negativa (-), promovendo a circulação do ar.



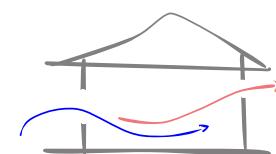
3 - Entrada menor que a saída

O desempenho da ventilação melhora quando a área de saída do ar é igual ou maior que a de entrada, favorecendo a aceleração do fluxo e a renovação contínua.



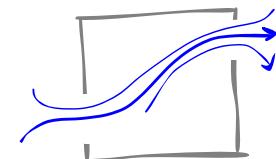
4 - Ar quente sobe, ar frio desce

O ar quente tem menos densidade que o ar frio, fazendo com que ele se acumule na parte superior do ambiente.

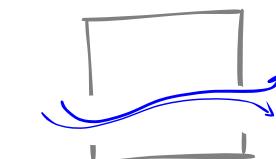


5 - Direção das Aberturas e Fluxo do Vento

A forma como o ar se move dentro de um ambiente é significativamente influenciada pela direção das aberturas em relação aos ventos e entre si.



Quando as aberturas estão em lados opostos e o fluxo é paralelo a elas, o vento tende a atravessar o ambiente de forma mais direta, proporcionando uma ventilação linear.





EVAPORAÇÃO



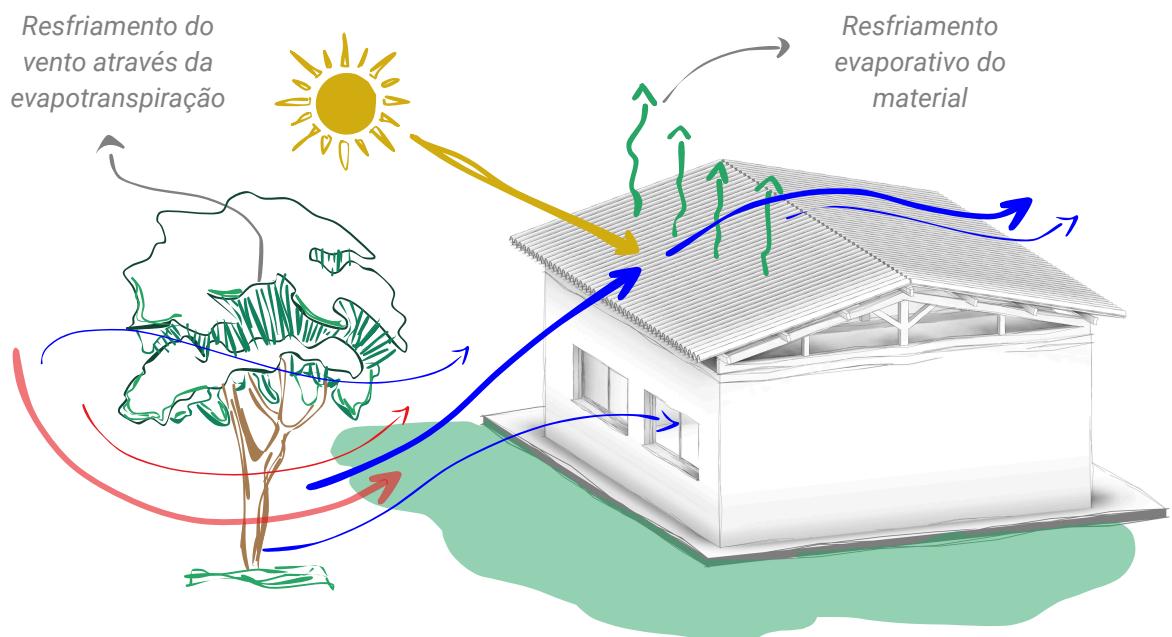
EVAPORAÇÃO

Processo de resfriamento através da transformação da água em vapor.

COMO FUNCIONA?

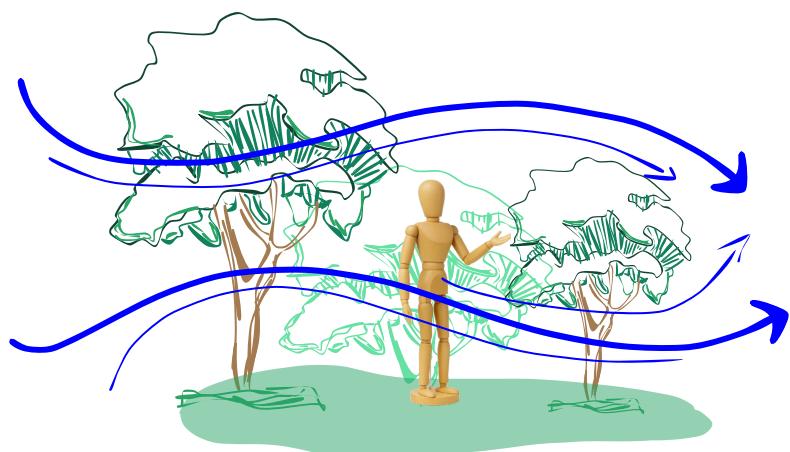
A evaporação é um processo de transferência de calor que ocorre quando a água passa do estado líquido para o gasoso. Durante essa mudança de fase, a superfície úmida perde calor e fica mais fria. Nas edificações, isso pode acontecer em superfícies expostas ao sol ou ao aquecimento do ar, ajudando no resfriamento natural da envoltória.

A vegetação também contribui para esse resfriamento. Por meio da evapotranspiração, as plantas liberam vapor d'água e reduzem a temperatura do ar ao redor, criando microclimas mais frescos e agradáveis.



Para entender melhor...

Em áreas com muita vegetação, o ambiente costuma ser mais fresco e úmido. Isso ocorre porque as plantas liberam vapor d'água, resfriando o ar. Da mesma forma, espelhos d'água, jardins e superfícies umedecidas nas edificações ajudam a diminuir a temperatura do ar próximo às superfícies, aumentando o conforto térmico.

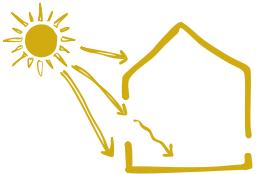


Quanto maior a presença de superfícies úmidas e vegetação, maior o processo de evaporação, reduzindo o calor acumulado e deixando o ambiente mais fresco.

ESTRATÉGIAS

Agora que compreendemos os princípios do desempenho térmico nas edificações, serão apresentadas as estratégias de condicionamento térmico passivo aplicáveis à edificações escolares existentes em clima quente e úmido. Cada estratégia será acompanhada de uma legenda que indica a qual (ou quais) processos reguladores ela se relaciona, permitindo visualizar como a radiação, condução, convecção e evaporação contribuem para seu funcionamento.

LEGENDA DE RELAÇÃO



Este símbolo indica as estratégias relacionadas ao processo regulador de **radiação**



Este símbolo indica as estratégias relacionadas ao processo regulador de **Condução**



Este símbolo indica as estratégias relacionadas ao processo regulador de **Convecção**



Este símbolo indica as estratégias relacionadas ao processo regulador de **Evaporação**

ÍNDICE DE ESTRATÉGIAS

I - Controle da Radiação Solar

01 - Estratégias de Sombreamento

A - Sombreamento Horizontal.

B - Sombreamento Vertical.

C - Sobreindo com a Vegetação.

II - Controle do Ganho Térmico em Superfícies

02 - Reduzindo o ganho térmico em coberturas

A - Em coberturas com telha fibrocimento.

B - Em coberturas com telha cerâmica.

C - Reduzindo o Ganho Térmico em Coberturas pelo processo de Convecção.

D - Reduzindo o Ganho Térmico em Coberturas pelo processo de Evaporação.

03 - Reduzindo o ganho térmico em Paredes

A - Sistema ETICS.

B - Mudando a cor das fachadas.

III- Uso otimizado de elementos vazado

04 - Usando cobogós

A - Sistema de Segunda pele

B - Ventilação permanente

C - Peitoril Ventilado

01 - ESTRATÉGIAS DE SOMBREAMENTO

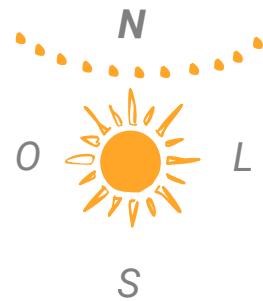
O sombreamento é uma das estratégias mais eficientes para reduzir o ganho de calor nas edificações, protegendo tanto as superfícies externas (paredes) quanto as aberturas (janelas e portas). Esses dispositivos devem ser dimensionados de acordo com o percurso solar e a incidência da radiação solar em cada fachada.



Esquema prático de dimensionamento das proteções solares para cada fachada:

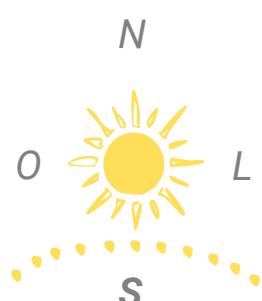
Fachadas Norte

Ângulo alto no Meio Dia (12h) e
Variação entre Noroeste e Noroeste
durante o dia



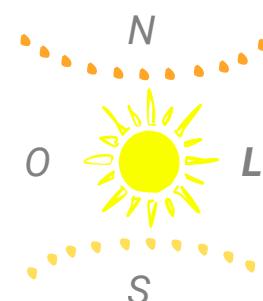
Fachadas Sul

Ângulo alto no Meio Dia (12h) e
Variação entre Sudeste e Sudoeste
durante o dia



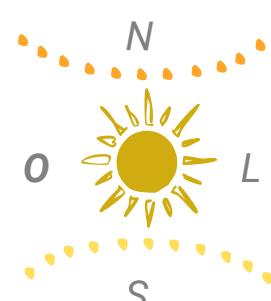
Fachadas Leste

Ângulo baixo, variando entre
Noroeste e Sudeste durante
o ano.



Fachadas Oeste

Ângulo baixo, variando
entre Noroeste e Sudoeste
durante o ano.



Dimensionamento Prático:
Proteção Vertical e Horizontal

Dimensionamento Prático:
Proteção Vertical e Horizontal

Dimensionamento Prático:
Vertical (regulável)

Dimensionamento Prático:
Vertical (regulável)

A

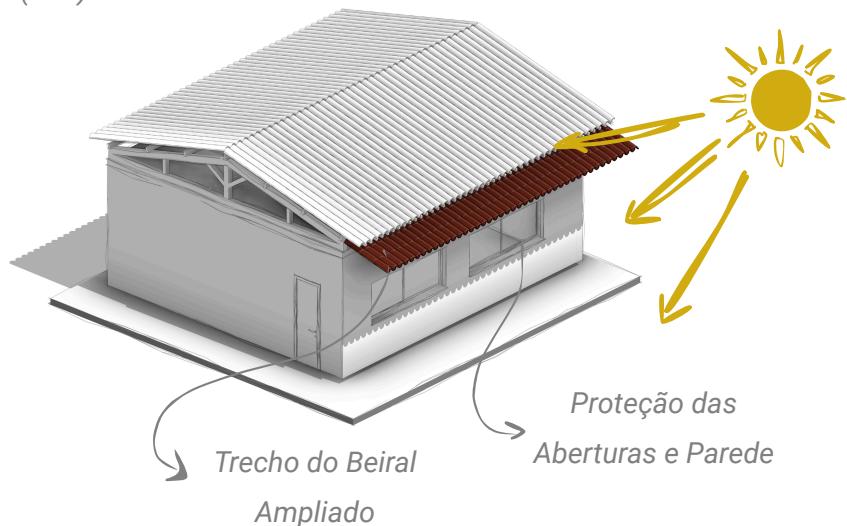
Sombreamento Horizontal

Onde instalar: Fachadas Norte e Sul (preferencialmente), podendo ser aplicadas também nas fachadas Leste e Oeste para proteger do sol a pino (por volta das 12h).

Principais Estratégias:

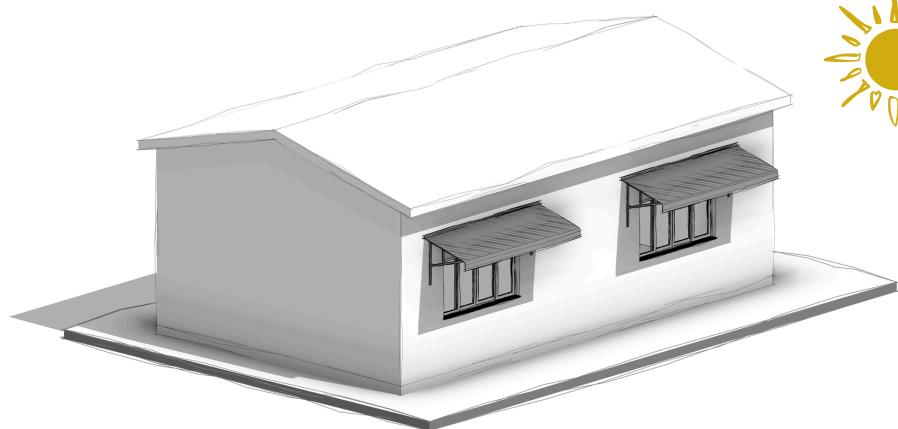
A1 - Ampliar os Beirais (Fachadas N/S/L/O)

Ampliar beirais é uma solução simples e eficiente. Eles reduzem a incidência direta do sol sobre as paredes e aberturas. Beirais amplos são ótimos para sombrear quando o sol está alto (12h).



A2 - Instalar Toldos (Fachadas N/S/L/O)

Os toldos são excelentes para bloquear a radiação solar direta nas aberturas. Podem ser fixos (para proteção permanente) ou retráteis (para maior flexibilidade).



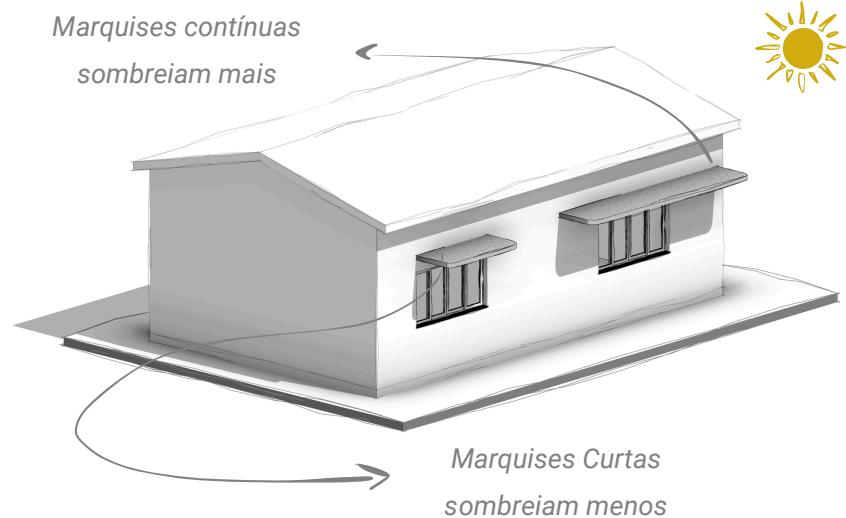
Toldo Instalado sobre Janela, permitindo o Bloqueio solar em horários de pico



Dica: Prefira materiais claros e refletivos, com proteção UV, como lonas de policarbonato ou tela solar. Evite materiais escuros, pois absorvem calor e podem aquecer.

A3 - Marquises (Fachadas N/S)

São elementos horizontais com saliência, capazes de proteger tanto aberturas quanto parte da fachada. Podem ser contínuas (protetendo grandes áreas) ou interrompidas (protetendo apenas a abertura).



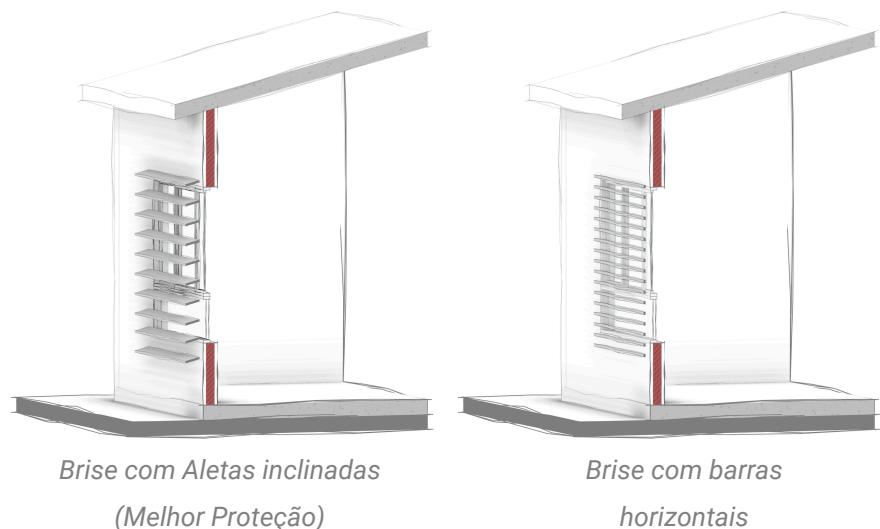
IMPORTANTE: para devido sombreamento, a profundidade da marquise deve profundidade com dimensão aproximada da metade da altura da abertura. Portanto, janelas com 1,10m de altura devem ser sombreadas com marquises com no mínimo 60cm.

Para as Marquises, materiais como metal, concreto ou madeira são comuns, mas é possível utilizar opções leves, como placas de EPS revestidas com argamassa e tela de fibra de vidro, combinação que garante a durabilidade e isolamento térmico.



A4 - Brises Horizontais (Fachadas N/S)

Compostos por aletas dispostas horizontalmente, são instalados sobre janelas para bloquear o sol mais alto, típico das fachadas Norte e Sul. Os brises podem ser configurados com barras horizontais ou aletas inclinadas, conferindo melhor bloqueio solar.



A5 - Caramanchões e Pergolados (Fachadas N/S/L/O)

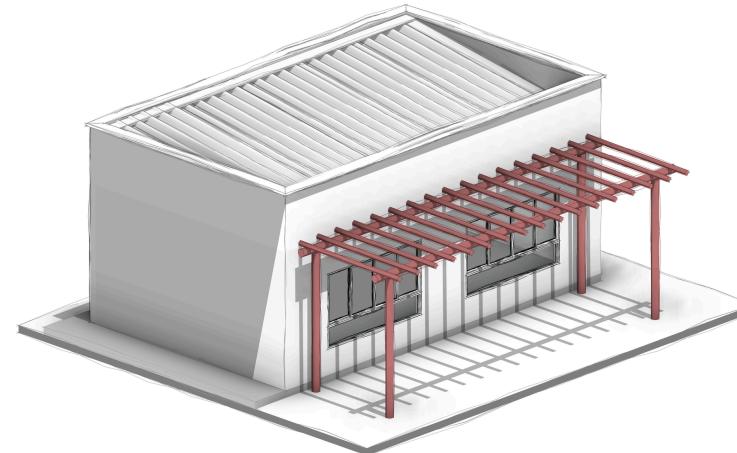
Os pergolados e caramanchões são estruturas de sombreamento compostas por vigas, ripas ou perfis dispostos de forma paralela ou perpendicular à fachada. Eles atuam como barreiras parciais à radiação solar, permitindo que parte da luz passe, mas bloqueando os raios diretos do sol em determinados horários.

A orientação das pergolas determina a sua eficiência!

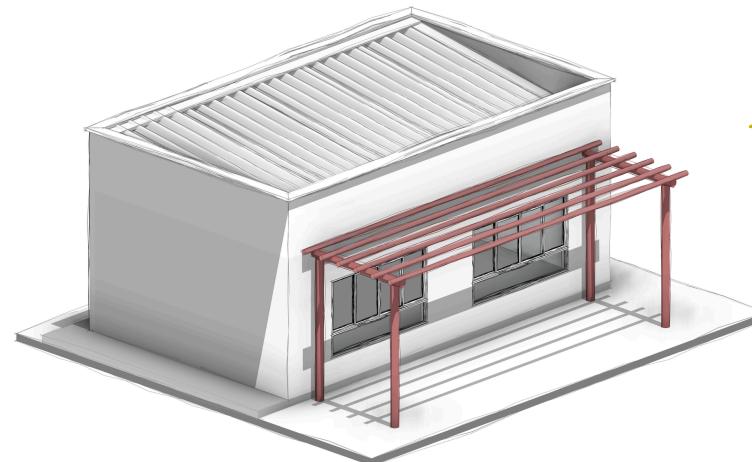
O desempenho do pergolado como elemento de proteção solar depende da orientação das peças em relação à fachada.

Quando combinados com vegetação, o sombreamento se torna dinâmico. As folhas regulam a entrada de radiação solar conforme o crescimento, além de criar um microclima mais fresco devido à evapotranspiração.

Peças perpendiculares à fachada: protegem o sol mais baixo, sendo indicadas para as fachadas **Leste** e **Oeste**, onde o sol incide pela manhã e à tarde.



Peças paralelas à fachada: bloqueiam melhor o sol mais alto, sendo eficazes nas fachadas **Norte** e **Sul**, principalmente ao meio do dia.



B

Sombreamento Vertical

Onde instalar: Fachadas Leste e Oeste, e também nas Norte e Sul quando o sol incide de forma baixa, no início da manhã ou fim da tarde.

Principais Estratégias:

B1 - Paredes laterais de proteção (Fachadas N/S/L/O)

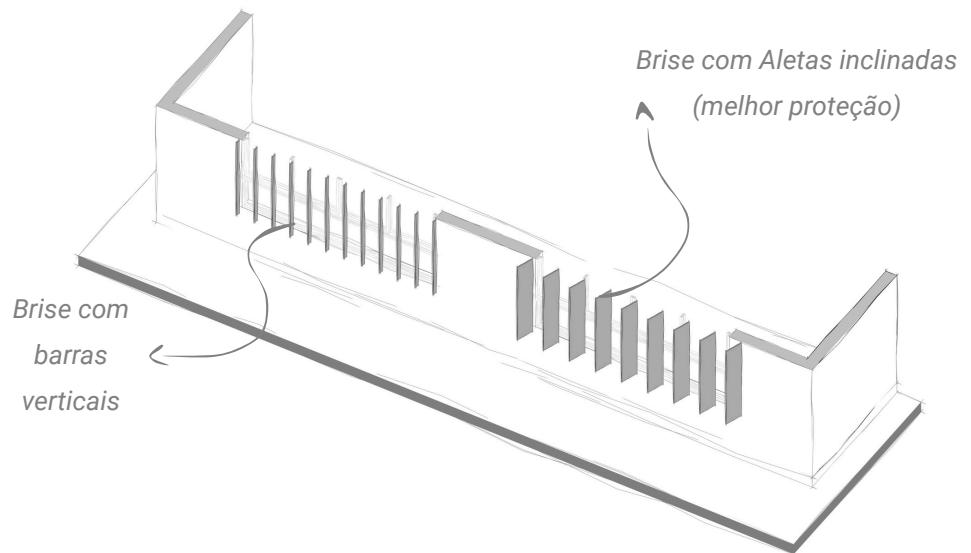
São volumes verticais instalados nas laterais das aberturas, de piso a teto, que bloqueiam o sol mais baixo. Podem ser feitos com materiais vazados, permitindo ventilação natural enquanto protegem da radiação direta.



Proteção vertical nas laterais das aberturas, protegendo da radiação solar

B2 - Brises verticais (Fachadas L/O)

Compostos por peças verticais, são indicados para fachadas Leste e Oeste, permitem o controle da radiação solar em angulos laterais.



Brises com aletas inclinadas são mais eficazes para a proteção. As aletas podem ser móveis, permitindo ajustar sua inclinação de acordo com a época do ano. Assim, garantem sombreamento quando o sol incide tanto mais ao Norte quanto mais ao Sul.



C

Sombreamento com Vegetação

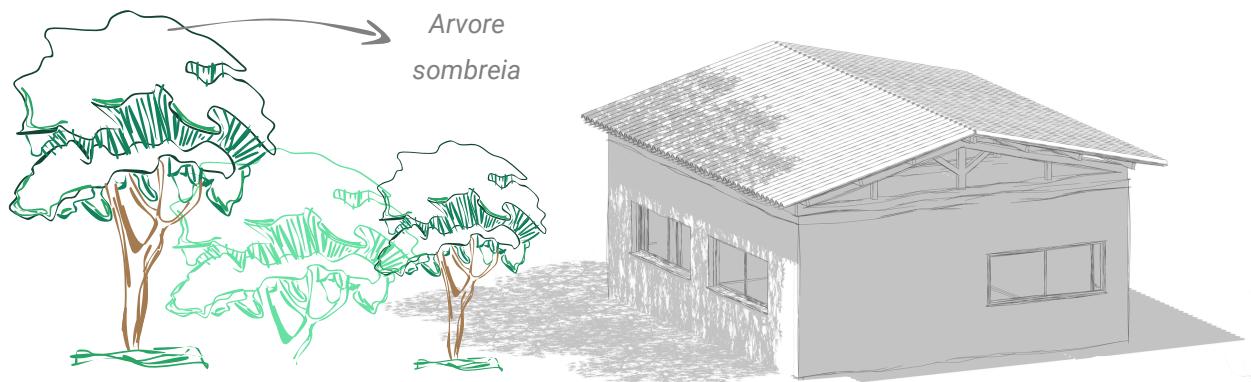


O uso da vegetação é uma das formas mais sustentáveis e agradáveis de sombreamento. Além de reduzir o ganho térmico, as plantas refrescam o ar por meio da evapotranspiração, contribuindo para o conforto térmico e a qualidade ambiental.

Principais Estratégias:

C1 - Árvores com copas amplas (Fachadas N/S/L/O)

Árvores bem posicionadas podem sombrear paredes e janelas, reduzindo significativamente o calor transmitido para o interior.



Quais Espécies usar:

Pau Brasil



Paubrasilia echinata

Médio Porte

Craibeira (Ipê amarelo)



Tabebuia aurea

Médio / Grande Porte

Araçá-rosa



Psidium cattleianum

Médio Porte

Aroeira pimenteira



Schinus terebinthifolia

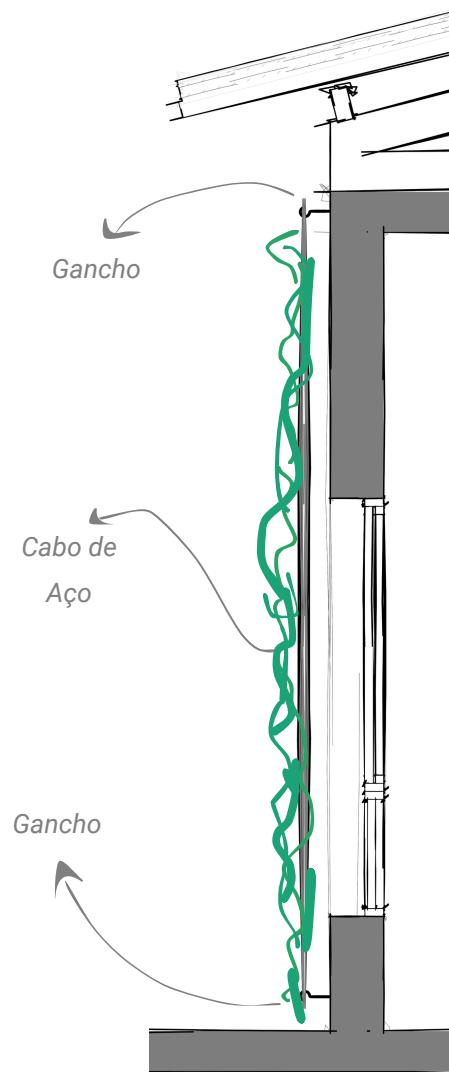
Médio Porte

C2 - Trepadeiras e jardins verticais (Fachadas N/S/L/O)

As estruturas verticais com trepadeiras ou painéis verdes são excelentes soluções para fachadas mais expostas ao sol, especialmente as Oeste. Além de proporcionar sombreamento natural, essas soluções melhoram o isolamento térmico da edificação e valorizam esteticamente a fachada.

Podem ser instalados cabos de aço, telas metálicas ou suportes leves para guiar o crescimento das plantas, criando uma camada verde sobre a alvenaria sem causar danos à estrutura.

Dica: Uma alternativa prática é fixar ganchos nas extremidades superior e inferior da fachada, conectando cabos de aço para as trepadeiras.



Quais Espécies usar
(Trepadeiras):

Maracujá



Passiflora cincinnata

Dipladenia



Mandevilla splendens

Flor de São Miguel



Petrea volubilis

02 - REDUZINDO O GANHO TÉRMICO EM COBERTURAS

A

Em coberturas com telha fibrocimento

Coberturas em telha fibrocimento esquentam mais, considerando as propriedades de condutividade, capacidade e resistência térmica.

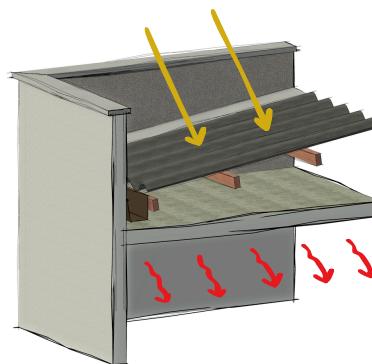
Pintura Térmica Branca Aumenta a Reflexão e reduz a absorção



Uma forma simples de melhorar o desempenho térmico das telhas de fibrocimento é aplicar **pintura térmica branca**. Esse acabamento **aumenta a refletância solar, reduz a absorção de calor** e mantém a cobertura mais fria durante o dia.

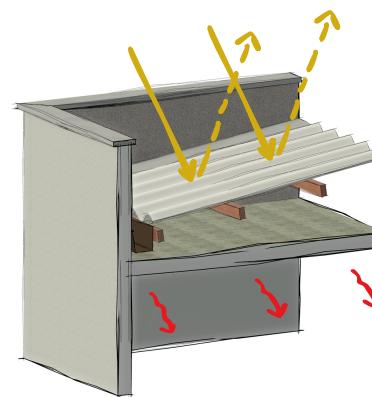


A aplicação da tinta térmica deve seguir as instruções do fabricante. Recomenda-se o apoio de um profissional qualificado para garantir a eficiência do material.



Cobertura sem aplicação da tinta térmica /

Sem a aplicação da tinta térmica, a cobertura absorve maior parte da radiação solar incidente, transferindo mais calor para o ambiente interno.



Cobertura com aplicação da tinta térmica /

Com a aplicação da tinta térmica, a cobertura passa a refletir mais a radiação solar, reduzindo o ganho térmico em até 10°C.

B

Em coberturas com telha cerâmica

A telha cerâmica possui menor condutividade e maior resistência térmica que a telha de fibrocimento. Assim, ela demora mais para aquecer e reduz a transferência de calor para o interior. Apesar de refletir menos radiação por sua cor avermelhada, sua maior massa térmica permite absorver o calor lentamente e liberá-lo à noite, quando as temperaturas estão mais amenas.

Manter a cobertura sempre limpa garante menor absorção térmica



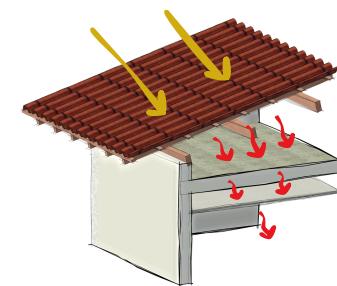
Considere realizar a limpeza da cobertura de forma periódica, evitando o desgaste e acúmulo de sujeira (poeira, matéria orgânica). Estudos indicam que o índice de reflexão de uma telha cerâmica nova (cerca de 40%) pode reduzir para 17% após um período sem limpeza, o que representa um aumento de aproximadamente 23% na absorção de calor (Louzich et al., 2016).

Instalar forro: Aumenta o Atraso e a Resistência Térmica



Considerando como critério o atraso térmico (característica que faz com que a telha cerâmica seja indicada para climas quentes e úmidos), indica-se como estratégia para redução do ganho térmico a instalação de mais camadas (forro) para auxiliar no atraso da transferência térmica para o ambiente interno. Com isso, indica-se a **instalação de forro em gesso** sobre as coberturas, estratégia que vai retardar e reduzir o ganho térmico.

OBSERVAÇÃO: Instalar forros é aceitável para qualquer tipo de cobertura!



Quanto mais elementos a cobertura apresenta, maior será a resistência e mais difícil será a transferência do calor para o ambiente interno.

Cobertura cerâmica + Laje + Forro em Gesso

C

Reducindo o Ganhão Térmico em Coberturas pelo processo de Convecção.

Essa estratégia bioclimática promove o resfriamento passivo ao permitir o fluxo da ventilação natural no espaço entre a camada de cobertura e a laje ou forro. Cria-se um movimento contínuo de ar que expulsa o calor acumulado, reduzindo significativamente a transferência térmica para o interior do edifício.

Direcionamentos para aplicação da estratégia:

- Criação de Aberturas:** Instale frestas, rasgos ou elementos vazados no espaço entre a cobertura e a laje/forro. Distribua essas aberturas no perímetro externo para permitir a entrada e saída de ar.
- Garantia do Fluxo Cruzado:** Posicione as aberturas em, no mínimo, duas faces opostas da construção. Isso estabelece o fluxo cruzado, garantindo a eficiente renovação do ar e a expulsão do calor.
- Aproveitamento do Vento Dominante:** Para maximizar a renovação, posicione a principal entrada de ar na face exposta à direção predominante dos ventos. Essa orientação potencializa o fluxo contínuo.

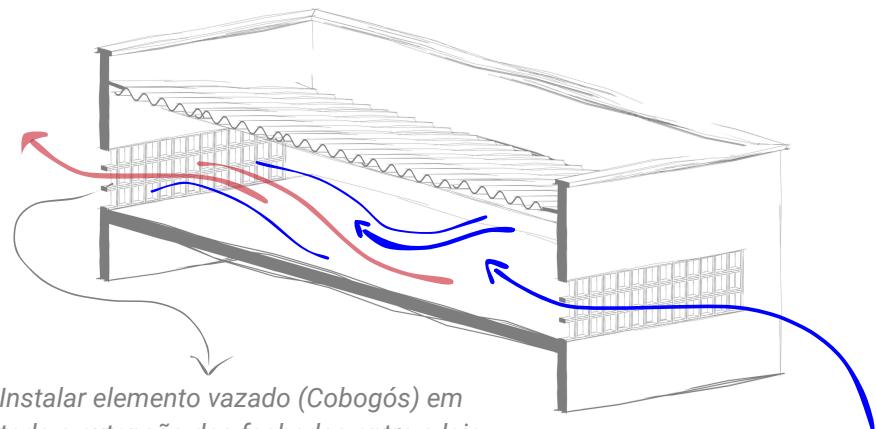


Abrindo espaço para o vento circular entre elementos de cobertura

C1 - Aplicação da estratégia entre Telhado e Laje em edificações com cobertura em platibanda:

Em coberturas que utilizam o sistema de platibanda (coberturas escondidas), a criação da câmara de ar ventilada exige intervenção na alvenaria externa.

Utilize elementos vazados (como Cobogós) em toda a extensão das fachadas, na faixa entre a laje e a telha.

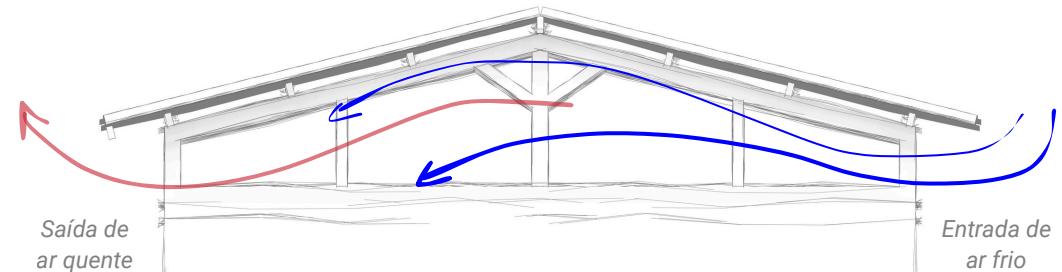


Instalar elemento vazado (Cobogós) em toda a extensão das fachadas entre a laje e a telha, permitindo a troca do ar quente pelo ar frio

C2 - Aplicação da estratégia entre Telhado e Laje em edificações com cobertura exposta.

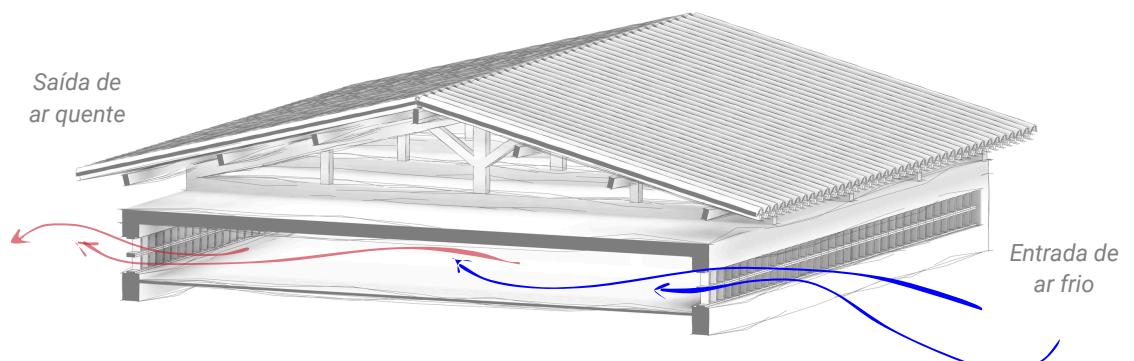
Em coberturas que utilizam o sistema de platibanda (coberturas escondidas), a criação da câmara de ar ventilada exige intervenção na alvenaria externa.

Utilize elementos vazados (como Cobogós) em toda a extensão das fachadas, na faixa entre a laje e a telha.



C3 - Aplicação da estratégia entre Laje e Forro:

Esta é uma alternativa para locais onde a elevação da cobertura ou aberturas diretas no telhado não são possíveis. Permite-se a ventilação no espaço entre a **laje** e o **forro**, realizando aberturas na alvenaria externa nesse nível. As aberturas devem ser feitas preferencialmente com elementos vazados (ex: Cobogós), dispostos em faces opostas, para garantir o fluxo contínuo e cruzado de ar.



Ao usar elementos vazados para permitir a troca térmica por convecção, lembre-se de instalar telas de proteção nos elementos, evitando que pequenos animais ou insetos entrem e se alojem entre os elementos da edificação

D

Reducindo o Ganho Térmico em Coberturas pelo processo de **Evaporação**.

Esquema para coleta de água:



Resfriamento evaporativo das superfícies de cobertura com a aspersão

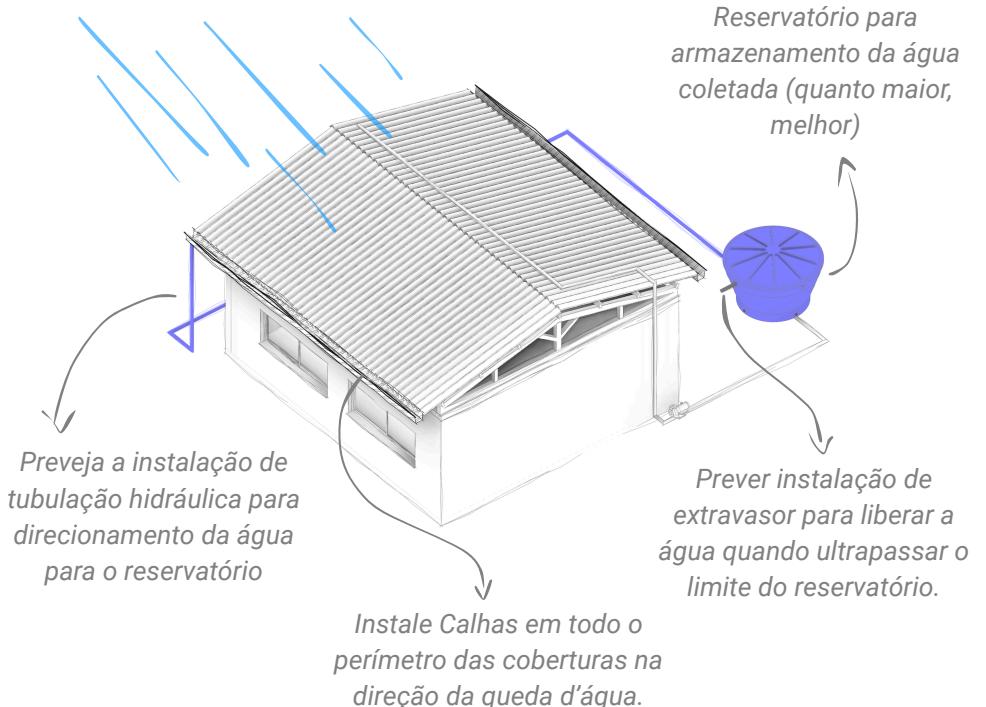
Essa estratégia utiliza a evaporação da água para reduzir a temperatura da superfície da cobertura, diminuindo a transferência de calor para o interior da edificação. O método consiste na instalação de aspersores que mantêm o telhado levemente umedecido nos períodos de maior insolação.

Primeira etapa: Coletar a água

A obtenção de água é fundamental. Dada a necessidade, o recurso deve ser utilizado de forma consciente e eficiente. Por isso, o reaproveitamento é fortemente recomendado.

Fonte: Água da Chuva

A água de chuva é a fonte mais indicada. Ela deve ser captada por calhas e armazenada em um reservatório de alta capacidade.



Quanto maior o volume coletado e reservado, maior será a autonomia do sistema, especialmente em períodos com baixa precipitação

Segunda etapa: Levar a água até a cobertura

Com a água armazenada, falta apenas enviá-la até o topo da edificação, onde ficará o sistema de aspersão.



Construir uma estrutura para apoiar um reservatório requer um projeto estrutural que pode ser caro, pensando nisso, indica-se a instalação de uma bomba para levar a água até a cobertura, processo que facilita a aplicação da estratégia.

A água é levada dos reservatórios até a cobertura por canos em PVC. É interessante que os canos tenham proteção UV para garantir uma melhor durabilidade, considerando que o local de instalação (coberturas) recebe grande parte da radiação solar.

Nos canos, são instalados **irrigadores do tipo aspersão** que realizam o efeito de "chuva artificial", umedecendo a superfície da cobertura que passa pelo processo de evaporação, resfriando a cobertura.

Equipamentos:



Bomba
D'água

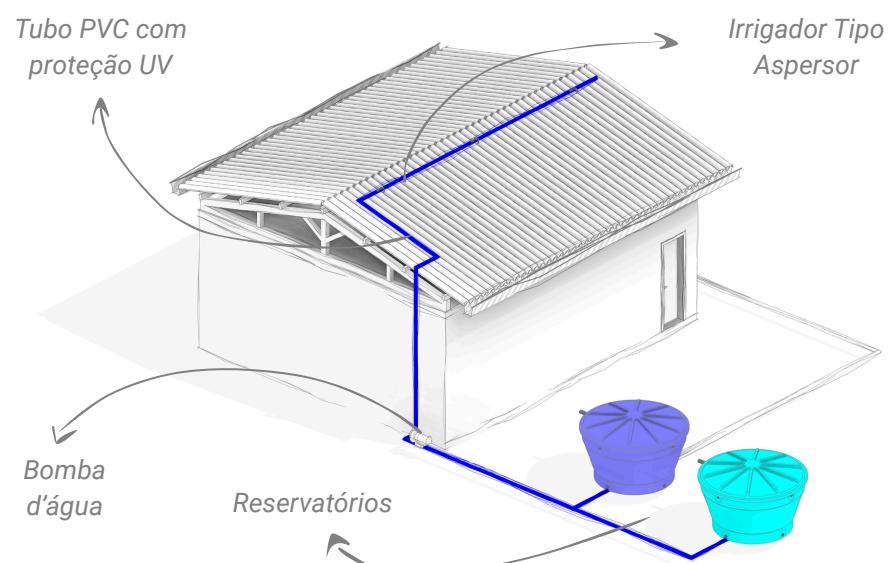


Irrigador Tipo
Aspersor



Tubo PVC com
proteção UV

Tubo PVC com
proteção UV



Orientações gerais para implantação da estratégia

Onde e Quando usar?

A água armazenada pelos sistemas de reaproveitamento e coleta de águas pluviais pode não ser suficiente para atender todo o parque escolar,

por isso, deve-se aplicar a estratégia nos blocos mais prejudicados pela radiação ou nos espaços de maior permanência. No contexto de edificações escolares, indica-se utilizar sobre os blocos de salas de aula.



O sistema deve ser acionado nas horas mais quentes do dia, resfriando a superfície de cobertura.

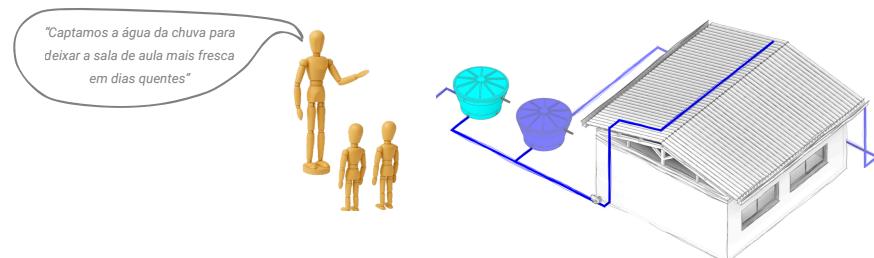
Orientação Técnica

Para dimensionar corretamente bomba, tubulação e reservatórios, recomenda-se consultar um profissional especializado. Isso garante eficiência, evita desperdício de água e energia, e aumenta a durabilidade do sistema.



Estratégia como produto pedagógico

Sempre que possível, mantenha a estrutura de coleta e armazenamento da água à mostra, isso permite a comunidade escolar visualizar o ciclo de reaproveitamento, tornando a estratégia de redução térmica um laboratório prático de eficiência ambiental.



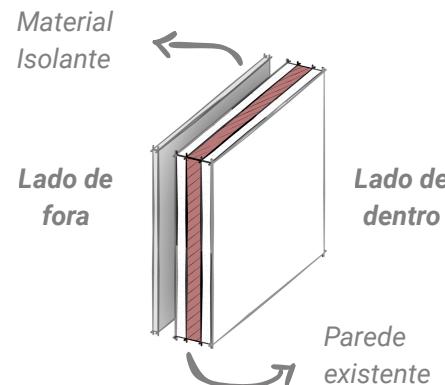
03 - REDUZINDO O GANHO TÉRMICO DAS PAREDES

A

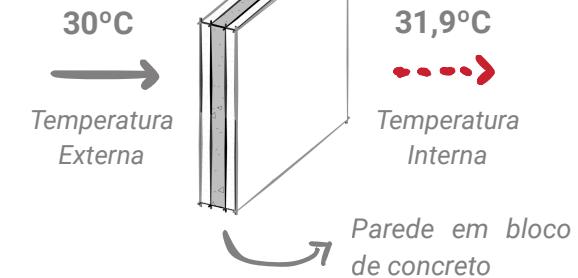
Sistema *ETICS*



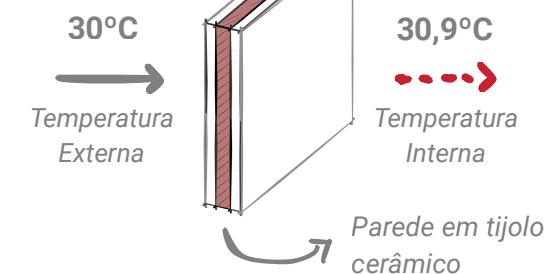
Esta estratégia consiste em aplicar EPS (Poliestireno Expandido) na face externa das paredes, formando uma camada isolante e reduzindo o ganho térmico. Esse sistema é conhecido como ETICS (External Thermal Isulation Composite System) e tem como função aumentar a resistência térmica da envoltória.



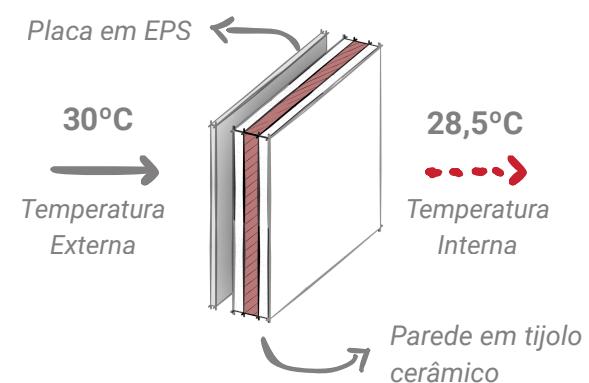
(1)



(2)



(3)



Como funciona na prática:

A comparação entre três sistemas de alvenaria – (1) bloco de concreto, (2) tijolo cerâmico e (3) tijolo cerâmico com placa de EPS – demonstra como a aplicação de material isolante na face externa reduz a temperatura no ambiente interno da edificação.

Guia Prático do Sistema Etics: Materiais e Aplicação

O sucesso do Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS) depende da escolha correta dos materiais e das etapas de aplicação.

1 - Escolha da Placa de EPS

A escolha da Placa de EPS (Poliestireno Expandido) deve ser feita considerando não só sua capacidade de isolante, mas a sua densidade e resistência à impactos, para garantir a durabilidade do sistema.

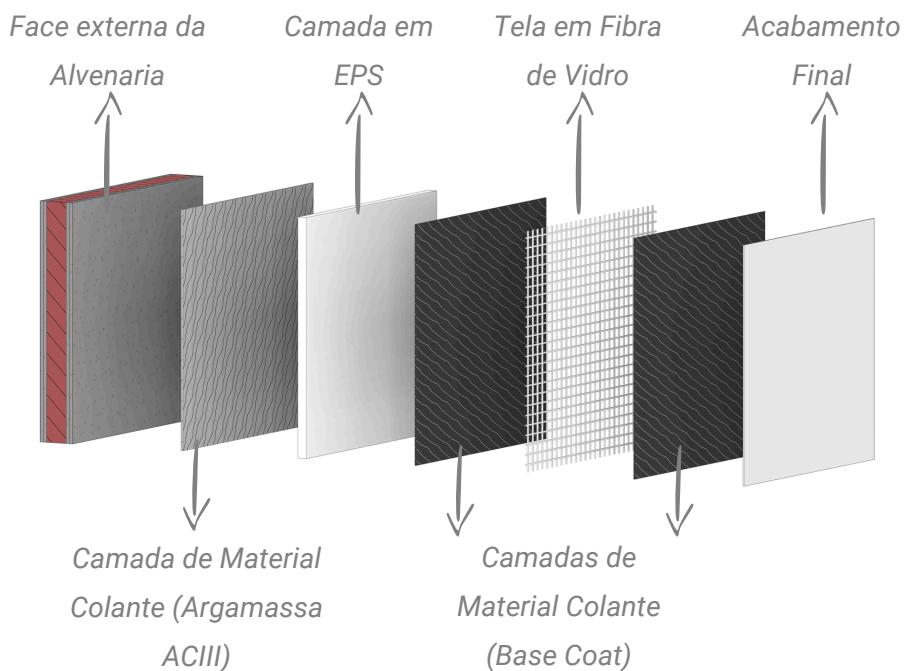
Para o uso como material isolante em fachadas, recomenda-se o **EPS tipo 5**, que possui menor condutividade térmica e boa resistência mecânica, garantindo durabilidade ao sistema.



Quanto mais espesso o EPS, mais **resistência** será atribuída ao sistema, por tanto, indica-se o uso de placas entre 4 à 6 cm.

Esquema de Montagem

O sistema ETICS é composto por camadas aplicadas a partir da face externa da alvenaria. Camadas compostas por materiais isolante (EPS), materiais de fixação (Argamassa ACIII e Buchas de Fixação), materiais que geram durabilidade (Base Coat e Tela em Fibra de Vidro) e Camada final de acabamento.



2 - Preparação e Fixação

Preparar a Superfície

Para instalação do sistema, a parede deve estar *limpa, seca e nivelada, sem buracos ou relevos que atrapalhem a fixação das peças em EPS*.

Fixar as peças

A aplicação das peças é feita através do uso de Argamassa tipo ACIII, que possui propriedades de fixação ideais para elementos externos.

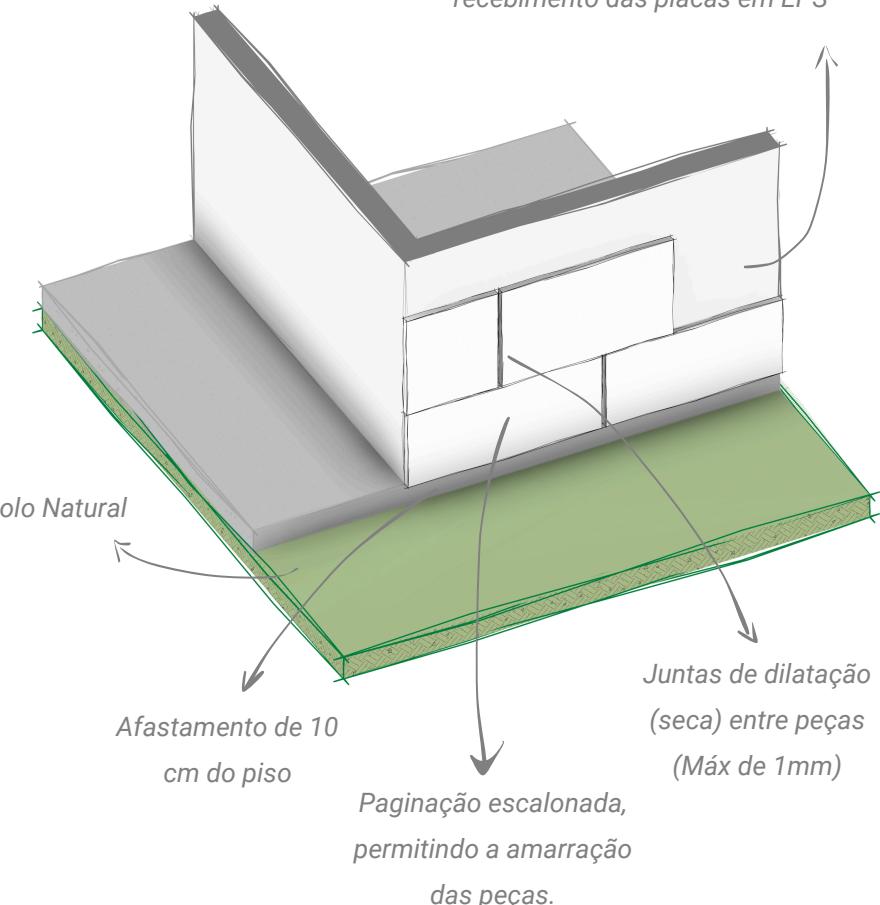


Precauções: Deixar um afastamento mínimo (10cm) entre o solo e a primeira peça. Neste espaço, deve ser instalado um Perfil de Arranque/Base para proteger o EPS da umidade do chão e garantir o alinhamento.



OBSERVAÇÃO: É importante que as peças sejam assentadas de forma nivelada, e em uma paginação que permita a amarração.

Alvenaria externa devidamente tratada para recebimento das placas em EPS



3 - Reforço e Camadas Finais

Aplicar o Base Coat + Tela de Fibra e Vidro

Após a aplicação das placas em EPS deve-se aplicar uma camada de Base Coat, massa aditivada com polímeros e fibras para recebimento da Tela de Fibra de Vidro.



A Tela de Fibra de Vidro é aplicada sobre o base coat e em seguida é aplicada mais uma camada do material para regularizar a superfície.



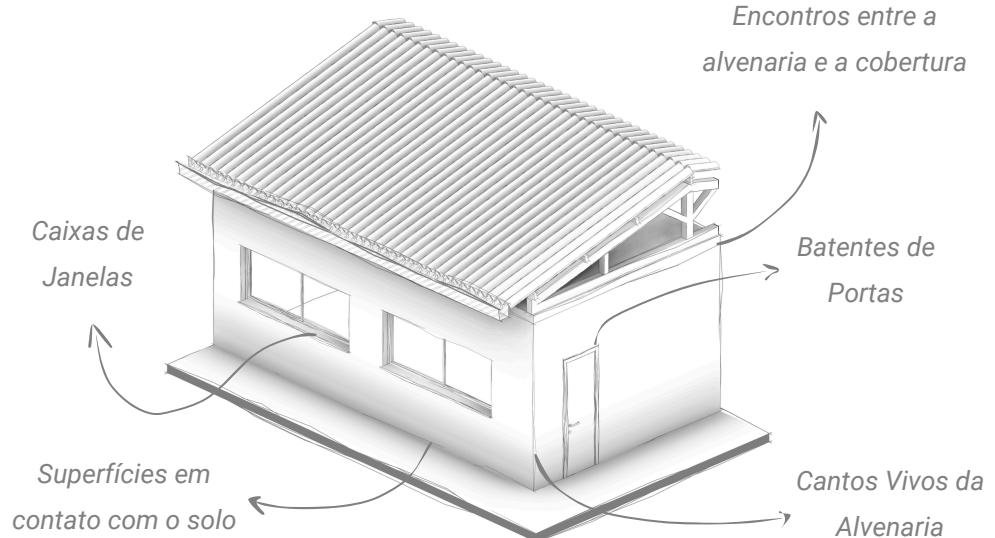
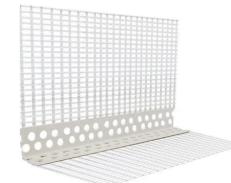
A tela atua como uma armadura de reforço que adiciona resistência externa, prevenindo que o EPS se desgaste ou que o sistema sofra fissuras por impactos.

OBSERVAÇÃO: É importante observar os direcionamentos de aplicação dos fabricantes dos materiais adquiridos para garantir a aplicação eficiente.



Tratar Pontos Críticos

Nas quinas, bordas de esquadrias e cantos, deve-se aplicar cantoneiras de PVC com tela de fibra de vidro, fixadas com Base Coat. A aplicação do material garante maior durabilidade e estanqueidade, pois estes pontos são vulneráveis à entrada de água e impactos.



Após os processos, o sistema está pronto para receber as camadas de acabamento, que podem ser em qualquer material (Pintura, Revestimento Cerâmico, Texturas diversas)

Orientações gerais para implantação da estratégia

Onde e Quando usar?

A estratégia deve ser utilizada nas fachadas mais expostas à radiação solar, especialmente nas faces Oeste.



Orientação Técnica

Apesar de ser um processo relativamente simples, a instalação do sistema ETICS deve ser acompanhada e executada por profissionais, garantindo o correto dimensionamento dos materiais e a aderência das camadas.

Sustentabilidade e cuidados ambientais

Embora o EPS seja composto majoritariamente por ar, com pouca quantidade de matéria prima, seu processo de fabricação gera muito carbono, tornando-o um material não biodegradável.

Por isso, é importante utilizá-lo com responsabilidade, aproveitando cortes e sobras de maneira eficiente e destinando resíduos para coleta especializada.



B

Mudando a cor das fachadas

A cor está diretamente relacionada à **refletância**, propriedade que permite a radiação solar ser refletida pelas superfícies, reduzindo a absorção do calor, reduzindo o ganho térmico por condução.

Pintar as paredes com cores claras permite a diminuição do ganho térmico



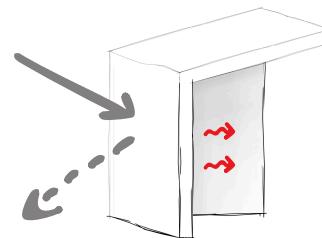
Qual cor escolher e onde aplicar

A estratégia de utilizar cores claras nas fachadas é aplicável em todas as faces da edificação. Ao escolher, é preciso ir além da técnica, considerando também a estética e as cores que representam o projeto ou a identidade visual de uma instituição, como uma escola.

A dica é: Defina as cores da identidade da escola e, a partir delas, selecione tons claros, ou reduza saturação e aumente a luminosidade. Assim, mantém-se o padrão visual desejado, maximizando a reflexão solar.



Esquema prático para decisão

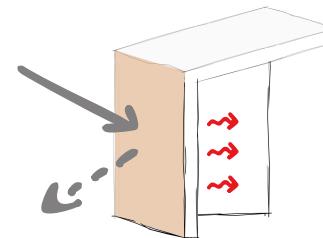


Exemplos: Branco; Branco Gelo; Cinza Platina

Faixa Ideal

Cores Claras apresentam refletância solar típica alta entre 60% a 90%

Refletância típica da cor Branco:
95%

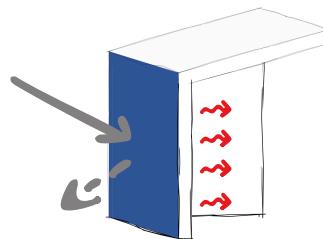


Exemplos: Camurça; Amarelo; Cinza Médio

Faixa Boa

Cores Médias apresentam refletância solar típica média entre 30% a 50%

Refletância típica da cor Camurça:
42,6%



Exemplos: Azul Escuro; Terracota; Vermelho

Faixa Ruim

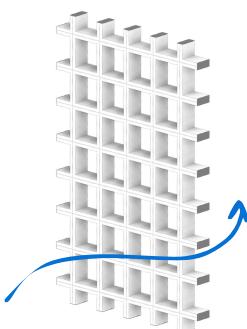
Cores Escuras apresentam refletância solar típica baixa entre 5% a 30%

Refletância típica da cor azul escuro:
26,7%

3 - USANDO O COBOGÓ

Os cobogós são elementos vazados que permitem a entrada contínua de ar, criam sombras, reduzem a temperatura da fachada e direcionam o fluxo de vento quando posicionados estrategicamente.

DIMENSÃO e **FORMATO** são características cruciais em elementos vazados. Para ventilação, priorize formatos com maiores aberturas. Se a necessidade for sombrear e bloquear parcialmente a radiação solar, opte por formatos com menor área vazada. Considere contratar um profissional para melhor dimensionamento!



A escolha do **material** e a **cor** dos elementos vazados é tão importante quanto o design. Prefira materiais cerâmicos. Ao utilizar peças de concreto, pinte-as em cores claras, a fim de evitar o superaquecimento por absorção de radiação.

A

Estratégia de Segunda Pele

A estratégia de segunda pele consiste na construção de uma parede de cobogós à frente das fachadas da edificação, funcionando como uma estratégia bioclimática integrada.

Essa estrutura pode atuar em diversas frentes:

1 - **Sombreamento**: Ao bloquear a radiação solar direta, reduzindo o ganho de calor nas superfícies da fachada.



2 - **Condução**: Pode ser utilizada junto às paredes, conferindo maior inércia e resistência térmica ao conjunto da vedação.



3 - **Convecção**: Permite a troca de calor entre as superfícies e auxilia no direcionamento do fluxo de ar, facilitando o resfriamento por ventilação.



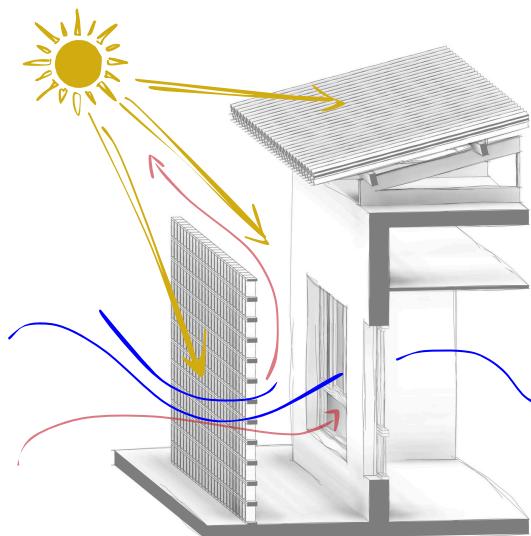
4 - **Evaporação**: Quando integrada à vegetação (por exemplo, trepadeiras), possibilita o resfriamento evaporativo do ar que passa por ela.



A regra geral é: quanto mais próxima a parede de cobogó estiver da fachada, melhor será o sombreamento das superfícies e aberturas, mas menores serão os efeitos convectivos de ventilação.

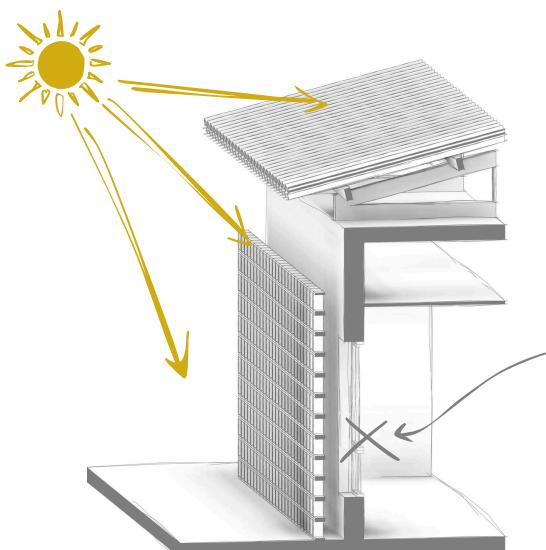
MAIOR DISTÂNCIA: Quando construída a uma distância maior que 1,00m da fachada, a parede de cobogó exerce duas finalidades: atuar como sombreamento contra o sol baixo (início e fim do dia) e, principalmente, promover a troca térmica por convecção e ventilação entre as superfícies.

MENOR DISTÂNCIA: Quando construída a uma distância menor que 30cm, a parede de cobogó proporciona melhor eficiência no sombreamento, podendo proteger a fachada até mesmo do sol a pino (meio-dia). Contudo, os efeitos convectivos se perdem, dificultando a ventilação para o ambiente interno devido ao bloqueio das peças.



Maior Distância

Para **sombreamento**, a instalação pode ser feita em qualquer fachada. Para **convecção**, a parede deve ser paralela à direção predominante dos ventos. Isso permite que o ar corra entre as paredes, potencializando os efeitos da ventilação



Menor Distância

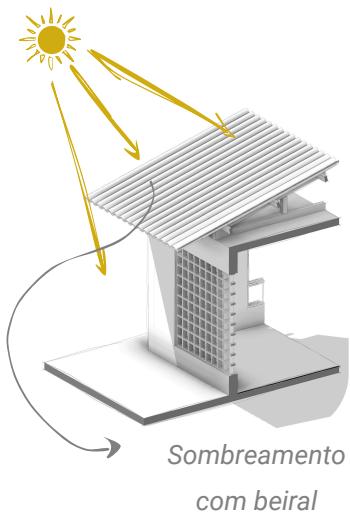
Indica-se esta solução para as fachadas Oeste, que recebem uma grande parcela da radiação solar.

ALERTA: Evite instalar esta solução em paredes que já possuam aberturas de ventilação, evitando a obstrução da passagem de ar.

B

Ventilação permanente

Criar aberturas com cobogós permite a ventilação permanente dos ambientes, sendo uma opção mais acessível em relação ao uso de esquadrias (janelas).



Para dimensionar as aberturas, utilize como critério a **direção predominante dos ventos** e os **Princípios de eficiência da Ventilação Cruzada**, apresentados na seção de convecção.

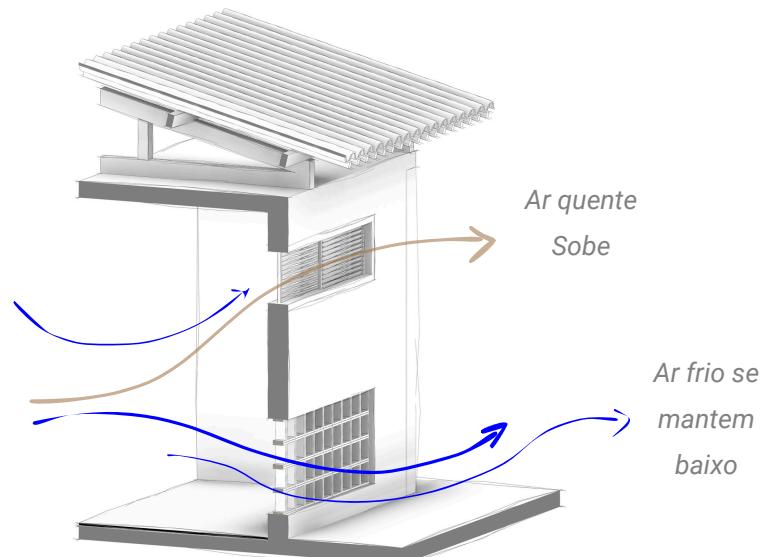


Cuidado com a radiação solar!

Embora o cobogó sombreie paredes externas, sua aplicação em aberturas de ventilação pode permitir a entrada de radiação solar direta, o que é indesejável. Portanto, ao utilizá-lo para ventilação, é fundamental prever o sombreamento, evitando o ganho térmico.

O dimensionamento correto pode direcionar o ar no ambiente de acordo com as necessidades dos usuários.

Em salas de aula, por exemplo, onde os alunos permanecem sentados durante a maior parte do tempo, pode-se planejar a instalação de aberturas baixas, até a altura do pescoço. Essa estratégia permite que o fluxo de ar percorra o ambiente na direção e no nível dos ocupantes, melhorando significativamente a sensação térmica.

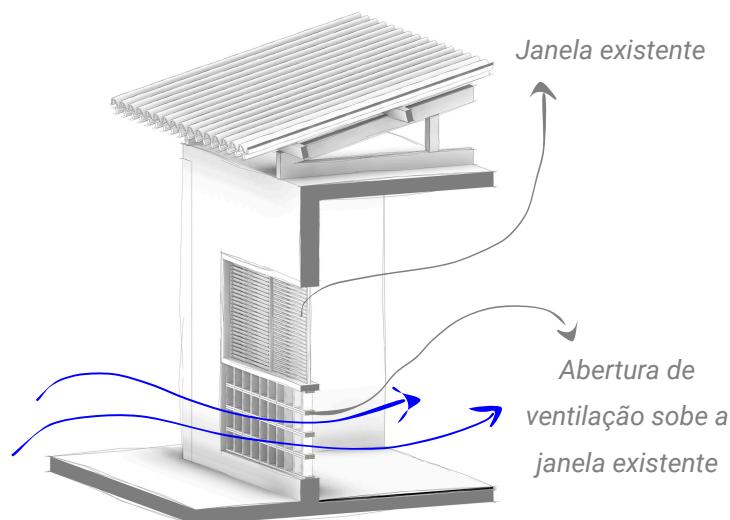


C

Peitoril Ventilado

 No clima quente e úmido, recomenda-se que as aberturas para ventilação sejam grandes, com área mínima de 40% da área do ambiente

A inserção de cobogós no peitoril pode ser uma solução eficiente quando a dimensão das aberturas das janelas existentes não for suficiente.



Observações sobre o uso de abertura de elementos vazados:

Ao sugerir a abertura de elementos vazados, é crucial que o dimensionamento considere o impacto em outras dimensões do conforto ambiental. Aberturas em excesso ou inadequadas podem prejudicar o conforto térmico e comprometer o conforto lumínico, ao permitir a entrada de iluminação em excesso que causa ofuscamento. Além disso, no conforto acústico, estas aberturas facilitam a transmissão de ruídos externos para o ambiente interno, exigindo um planejamento que busque o equilíbrio entre as diversas dimensões do conforto.



Evite Erros! Busque a assistência de profissionais capacitados para o dimensionamento correto das estratégias.

AGORA É COM VOCÊ!

Este material apresentou os principais conceitos de termorregulação da edificação e algumas estratégias aplicáveis em edificações escolares já construídas. Você agora comprehende as ferramentas disponíveis para lidar com os principais processos reguladores – radiação, condução, convecção e evaporação – elementos cruciais para o conforto térmico em edificações situadas em climas quentes e úmidos.

Decida de forma estratégica e colaborativa:

Cada edificação possui suas particularidades arquitetônicas e de orientação. Por isso, deve-se realizar uma seleção cuidadosa de quais estratégias são as mais adequadas para cada caso específico.

Para alcançar a melhor performance e viabilidade, esta decisão deve ser tomada em conjunto com arquitetos e profissionais técnicos. Essa colaboração permitirá integrar as soluções passivas de forma eficiente.



REFERÊNCIAS

- BOGO, A. et al. *Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico*. [S. I.]: [s. n.], 1994. 83 p.
- FERNANDES, S. C. (DES)CONFORTO TÉRMICO NA SALA DE AULA: EXPLORANDO SUA RELAÇÃO COM A APRENDIZAGEM. In: ENALIC, 9., 2023. *Anais do IX ENALIC*. [S. I.]: Realize Editora.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo*. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- DEMA (Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte). *Caracterização do Clima do Rio Grande do Norte*. Natal, RN: IDEMA, 2013.
- IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. p. 1-34. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- KOWALTOWSKI, D. *Arquitetura Escolar: o projeto do ambiente de ensino*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- LAMBERTS, R. et al. *Desempenho térmico de edificações*. 7. ed. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014.
- LAZZAROTTO, N. Adequação do modelo PMV na avaliação do conforto térmico de crianças do ensino fundamental de Ijuí-RS. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2007.
- LIGUORI, I. N.; LABAKI, L. C. Avaliação do conforto térmico em ambiente escolar: comparações entre o modelo adaptativo e respostas de sensação e preferência térmica. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. *Anais [...]*. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1–8. DOI: 10.46421/entac.v18i.895.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. L. P. de; DAL'ANNIO, L. B.; NARDI, A. S. L. V.; KLEIN, G. M. B. Avaliação comparativa do conforto térmico resultante da carta bioclimática de Givoni com dados de pesquisa de sensação térmica em residências em Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 774–780. DOI: 10.46421/entac.v17i1.1408.
- AQUINO, A. F. S. Avaliação Térmica em Telhas com Material Reciclado para Serem Utilizadas em Construções Rurais. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2017.
- ARAUJO, M. R. de O. Conforto térmico em salas de aula localizados em clima quente e úmido: uma avaliação do limite inferior da zona de conforto. 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.
- ARAUJO, V. M. D. de. Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro. 1996. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Acesso em: 20 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15575-1: Edifícios habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16401-2: Instalações de condicionamento de ar – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2024.
- BATIZ, E. C. et al. Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. *Production*, v. 19, n. 3, p. 477–488, 2009.
-

REFERÊNCIAS

- MAGOGA, P. M.; MURARO, D. N. A escola pública e a sociedade democrática: a contribuição de Anísio Teixeira. *Educação & Sociedade*, v. 41, e236819, 2020.
- MEDEIROS, C. S. de. Avaliação do conforto térmico em edificações escolares no semiárido potiguar: estudo aplicado em escolas do ensino médio na cidade de Caicó/RN. 2019. 162f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- MENDES, V. F. et al. Análise de desempenho térmico de edificações: Uma revisão narrativa incluindo a influência dos fechamentos. In: *ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS*, 5., 2023. Anais [...]. [S. I.], 2023.
- METEOBLUE. Clima Modelado Histórico para Macaíba. 2024. Disponível em:
https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/climatemodelled/maca%c3%adba_brasil_3396048. Acesso em: 25 mar. 2025.
- NEGREIROS, B. de A. Análise de métodos de predição de conforto térmico de habitação em clima quente-úmido com condicionamento passivo. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Conforto no Ambiente Construído; Forma Urbana e Habitação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- NOVAIS, J. W. Z. et al. Comparação do Desempenho Térmico de Painéis em EPS como Alternativa aos Tijolos Cerâmicos no Conforto Térmico de Residências em Cuiabá-MT. UNOPAR Científica. Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 13, n. 1, p. 39-43, nov. 2014.
- ORNSTEIN, S. W.; ROMÉRO, M. Avaliação pós-ocupação (APO) do ambiente construído. São Paulo: Studio Nobel; Editora USP, 1992.
- PACHECO, G. H. S. Determinação de recomendações bioclimáticas para habitação de interesse social de quatro climas do Rio Grande do Norte. 2016. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- PAGNOSSIN, E. M.; BURIOL, G. A.; GRACIOLLI, M. A. Influência dos elementos meteorológicos no conforto térmico humano: bases biofísicas. *Disciplinarum Scientia. Saúde*, v. 2, n. 1, p. 149–161, 2016.

REFERÊNCIAS

- PARK, R. J.; BEHRER, A. P.; GOODMAN, J. *Learning is inhibited by heat exposure, both internationally and within the United States*. *Nature Human Behaviour*, v. 5, n. 1, p. 19-27, 2021.
- RIBEIRO, M. S.; MONTE, M. C. do. *O DESCONFORTO TÉRMICO NAS “SAUNAS DE AULA” E O PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM: UMA REFLEXÃO SOBRE A SALA TEMÁTICA DE GEOGRAFIA SITUADA EM UMA ESCOLA PÚBLICA DO ESTADO DE RORAIMA*. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, [S. I.], v. 11, n. 5, p. 1140–1155, 2025. DOI: 10.51891/rease.v11i5.19042.
- ROMERO, M. A. B. *A arquitetura bioclimática para o desenho urbano*. Brasília: Universidade de Brasília, 2013.
- SILVEIRA, G. W. P. da et al. *Conforto térmico em salas de aula: estado da arte das pesquisas nacionais*. In: *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 17., 2018, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 1038–1046. DOI: 10.46421/entac.v17i1.1444.
- SOUZA, J. F. de; BRASILEIRO, M. C.; NODA, L.; LEDER, S. M. *Estudo de conforto térmico em salas de aula ventiladas naturalmente no clima quente e úmido*. In: *ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 15., 2019. Anais [...]. [S. I.], 2019. p. 1241–1250.
- WARGOCKI, P.; WYON, D. P. *The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on performance of school work by children*. *Proceedings of Indoor Air I*, v. 1, p. 368-72, 2005.
- Wahrlich, V., & Anjos, L. A. dos .. (2001). *Aspectos históricos e metodológicos da medição e estimativa da taxa metabólica basal: uma revisão da literatura*. *Cadernos De Saúde Pública*, 17(4), 801–817. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2001000400015>
- LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL – UFRN. *Sombreamento*. Natal: UFRN, 2023. Disponível em: <[arquivo fornecido em aula](#)>.
- WEATHER SPARK. *Clima característico em Macaíba, Rio Grande do Norte, Brasil durante o ano*. 2025. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/31428/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Maca%C3%A3ba-Rio-Grande-do-Norte-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 13 set. 2025.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Atlas Brasileiro de Energia Solar – Atlas Solarimétrico do Rio Grande do Norte*. São José dos Campos: LABREN/INPE, 2017. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_RN.html. Acesso em: 13 set. 2025.