

INTEGRAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CLIMATIZAÇÃO EM ESCOLAS NO CONTEXTO CLIMÁTICO DE BRASÍLIA (DF)

TOMAZ SILVA GONZALES

ORIENTADOR:
PROF. DR. CAIO FREDERICO E SILVA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO



Dissertação de Mestrado

**Integração de Estratégias Passivas de Climatização em Escolas
no Contexto Climático de Brasília (DF)**

Autor:

TOMAZ SILVA GONZALES

Orientador:

CAIO FREDERICO E SILVA, PhD | PPG-FAU/TAS

Banca Examinadora:

VANDA ALICE ZANONI, PhD | PPG-FAU/TAS

JOÃO MANOEL DIAS PIMENTA, PhD | ENM-UNB

GUSTAVO DE LUNA SALES, PhD | PPG-FAU/TAS (Suplente)

Brasília, 20 de maio de 2021

Agradecimentos

A Deus pelo Seu constante cuidado e sustento. Em todos os momentos, Sua presença foi minha força e alegria, que deu sentido claro a essa jornada. Seus planos são perfeitos e muito maiores do que os meus, planos que me dão paz e esperança.

À professora Suely Gonzales, pelo seu apoio incondicional e exemplo que me deu sobre o valor da pesquisa e do conhecimento. Este trabalho não existiria se não fosse por sua paixão pela Academia, entusiasmo que inspira jovens pesquisadores como eu, seu neto.

Ao meu orientador, professor Caio, pela paciência e direcionamento, mantendo firme o propósito dessa dissertação e conduzindo com leveza seu desenvolvimento. Aos membros da banca de defesa e qualificação com suas valiosas contribuições, professora Vanda por sempre acreditar e incentivar esse trabalho desde o primeiro momento, e professor João Pimenta pelo companheirismo de longa data e seriedade na valorização de nossa profissão.

Aos grupos de pesquisa SiCAC e LaSUS, com colegas que foram de grande importância para novas ideias e visões, pelo alívio e encorajamento que os bons encontros me proporcionaram; e com seu excelente corpo docente que formou a visão de ciência que hoje possuo. Ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPGFAU/UnB, por ter adotado mais um engenheiro, ofertando riqueza em conhecimento e vivências.

Ao meu pai Saulo e à minha mãe Lara, que me ensinaram a reconhecer e a agradecer todas as bênçãos que pude ter, proporcionadas pela graça do Senhor. Aos meus familiares e amigos, é muito bom ter vocês por perto, obrigado pela compreensão e apreço, mesmo muitas vezes com minha ausência. À minha nova família – em destaque Eber, Míria e Sara – vocês são um presente de Deus em minha vida.

À minha querida Ester, em especial, por ter acompanhado e auxiliado em cada detalhe dessa caminhada, como namorada, noiva, e agora esposa, mas também como doutoranda, e agora Doutora. Obrigado por tudo, desde a parte emocional até a própria pesquisa em si. Você me fez “segurar as pontas”, através do seu carinho e confiança. Sua admiração me impulsiona, sua sensibilidade e inteligência me fascina, todos os dias.

“Não to mandei eu? Esforça-te e tem bom ânimo; não pasmes, nem te espantes, porque o Senhor, teu Deus, é contigo, por onde quer que andares” (Josué 1:9)

Resumo

Edificações educacionais devem prover adequadas condições térmicas, para que o ambiente da sala de aula possa potencializar a participação, aprendizagem e ensino dos alunos. Para o controle das condições de conforto térmico aliado a baixo consumo energético, uma alternativa é o uso de estratégias passivas. Normalmente estudos avaliam estratégias passivas isoladamente, porém evidências sugerem que a combinação dessas estratégias pode contribuir no aumento de conforto térmico. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência de estratégias passivas de climatização, isoladas e integradas, no conforto térmico de uma sala de aula inserida no contexto climático de Brasília. Para isso, um modelo computacional foi produzido no software EnergyPlus v9.3, tendo como base um projeto de escola padrão do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE). As estratégias que foram empregadas no modelo são: trocador de calor solo-ar (EAHE), materiais de mudança de fase (PCM), chaminé solar e massa térmica, avaliando-as em modelos isolados e integrados. Assim, realizou-se uma análise paramétrica com 3.200 simulações, variando os parâmetros construtivos e operacionais. A influência das estratégias no conforto térmico foi verificada por meio de análises de sensibilidade e incerteza, resultando em dados que subsidiaram um processo de otimização dos atributos de parâmetros. Como resultado, uso da chaminé solar reduziu o número de horas de desconforto em 15,67%, comparado sem a sua aplicação. Já o resultado de conforto térmico empregando três estratégias combinadas é melhor do que os outros modos de combinação, de forma significativa. O comprimento da tubulação do EAHE possui boa correlação com o conforto térmico, assim como a temperatura de mudança de fase do PCM (sendo a temperatura ótima de 23°C). Após a otimização, o modelo com melhor resultado possui três estratégias passivas e reduziu em mais de 47% o número de horas em desconforto, em relação ao modelo sem estratégias aplicadas. Portanto, conclui-se que a combinação de estratégias passivas possui positivo impacto no aumento de conforto térmico em edificações educacionais, sobretudo em salas de aula.

Palavras-chave: Climatização Passiva; Conforto Térmico; Escolas; *EnergyPlus*; Análise Paramétrica.

Abstract

Educational buildings should provide adequate thermal conditions, so the classroom environment could enhance the participation, learning and instruction of its users. To control thermal comfort conditions associated with low energy consumption, an alternative is using passive strategies. Usually, research approach passive strategies isolated, but evidence suggest that the combination of these strategies can increased thermal comfort. Thus, the objective of this work is to evaluate the influence of isolated and integrated passive strategies for cooling in the thermal comfort of a classroom inserted in the climatic context of Brasília. For this, a computational model was developed in EnergyPlus v9.3, based on a standard school project from the National Education Development Fund (FNDE). The strategies that were used in the model are: earth-air heat exchanger (EAHE), phase change materials (PCM), solar chimney and thermal mass, evaluating them in isolated and integrated models. Thus, a parametric analysis was carried out with 3200 simulations, varying the constructive and operational parameters. The influence of the strategies in thermal comfort was verified by means of sensitivity and uncertainty analyzes, disclosed in data that subsidized an optimization process of the parameters' attributes. As a result, the use of the solar chimney reduced the number of hours of discomfort by 15.67%, compared by not applying it. The result of thermal comfort using three combined strategies is significantly better than the other combination modes. The length of the EAHE tubes has an important correlation with thermal comfort, as well as the phase change temperature of the PCM (the optimum temperature is 23°C). After optimization, the model with the best result has three passive strategies and has reduced the number of hours in discomfort by more than 47%, compared to the model without its application. Therefore, it concludes that the combination of passive strategies has a positive impact on the increase of thermal comfort in educational buildings, comprehending classrooms.

Keywords: Passive Cooling; Thermal Comfort; Schools; *EnergyPlus*; Parametric Analysis.

Figuras

FIGURA 1 – TIPOS DE SISTEMAS PASSIVOS DE CLIMATIZAÇÃO	6
FIGURA 2 – ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CLIMATIZAÇÃO AGRUPADAS EM TIPOS DE SISTEMAS	7
FIGURA 3 – COMBINAÇÕES EFETIVAS DE SISTEMAS PASSIVOS DE RESFRIAMENTO E VENTILAÇÃO	8
FIGURA 4 – CRESCIMENTO NO NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOB A STRING SELECIONADA PARA O RSL	9
FIGURA 5 – SALA DE TESTE ARREFECIDO POR UM SISTEMA PASSIVO COMPOSTO POR EAHE E CHAMINÉ SOLAR	11
FIGURA 6 – SISTEMA DE ARREFECIMENTO EAHE DE UMA EDIFICAÇÃO CONECTADO A UMA PLACA FOTOVOLTAICA	12
FIGURA 7 – EAHE CONECTADO AO FORRO DE PCM DO AMBIENTE PARA DESCARGA TÉRMICA DO MATERIAL	13
FIGURA 8 – TORRE DE VENTILAÇÃO NA ENTRADA DO EAHE PARA ELEVAR O FLUXO DE VENTO DO SISTEMA	14
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ADOTADAS PELO EDIFÍCIO LUCIA	16
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM TROCADOR DE CALOR SOLO-AR	19
FIGURA 12 – SISTEMA DE CLICO ABERTO (À DIREITA) E DE CICLO FECHADO (À ESQUEDA)	20
FIGURA 13 – TUBULAÇÃO EM PARALELO (À ESQUERDA) E TUBULAÇÃO SINGULAR (À DIREITA)	21
FIGURA 14 – TUBULAÇÃO ENRUGADA COM ARRANJO EM PARALELO	23
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CHAMINÉ SOLAR	25
FIGURA 16 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA CHAMINÉ SOLAR POR CIRCUITOS ELÉTRICOS	26
FIGURA 17 – EXEMPLOS DE CONFIGURAÇÃO PARA UMA CHAMINÉ SOLAR.	28
FIGURA 18 – MÉDIA DE LONGO PRAZO PARA A RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL.	30
FIGURA 19 – A) PLACA DE PCM 5MM ENERGAIN E B) CONDUTIVIDADE TÉRMICA E ENTALPIA DO PCM	31
FIGURA 20 – IMPACTO DA ORIENTAÇÃO, TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO E ESPESSURA NO CONSUMO ENERGÉTICO NAS CIDADES A) ALICE SPRINGS E B) HOBART	34
FIGURA 21 – PORCENTAGEM ANUAL DE CONFORTO TÉRMICO COM E SEM PCM	35
FIGURA 22 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O DESEMPENHO DE VENTILAÇÃO NATURAL POR POSICIONAMENTO DE ABERTURAS	36
FIGURA 23 – ILUSTRAÇÃO DOS DAS LINHAS DE FLUXOS DE VENTILAÇÃO POR ABERTURAS POSICIONADAS EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES	37
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO DAS FAIXAS DE TEMPERATURA DE CONFORTO ENTRE O MODELO ADAPTATIVO E PMV	38
FIGURA 25 – GRÁFICO DA FAIXA DE CONFORTO ADAPTATIVO, COM ACEITABILIDADE 80% E 90%	39
FIGURA 27 – ETAPAS DA METODOLOGIA PROPOSTA	43
FIGURA 27 – ETAPAS DA METODOLOGIA PROPOSTA	44
FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DA ETAPA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL PRELIMINAR	45
FIGURA 29 – LOCALIZAÇÃO DA SALA DE AULA 4 NO PROJETO ARQUITETÔNICO DE ESCOLAS PADRÃO 4 SALAS DO FNDE	46
FIGURA 30 – ESCALA DE OCUPAÇÃO DA SALA DE AULA 4	47
FIGURA 31 – MODELO PROPOSTO POR RORIZ (ESQUERDA) E CORTE DE SEÇÃO DA CHAMINÉ SOLAR MODELADA (DIREITA)	48
FIGURA 32 – FLUXOGRAMA DA ETAPA DE COMPOSIÇÃO DOS MODELOS PASSIVOS	50
FIGURA 33 – FLUXOGRAMA DA ETAPA DE PROCESSAMENTO DE DADOS E RESULTADO GERAL	54
FIGURA 34 – RESULTADOS DE POC E RAH PARA AS SIMULAÇÕES DO MODELO COM CHAMINÉ SOLAR	57
FIGURA 35 – DENSIDADE DE FREQUÊNCIA PARA O RESULTADO DE TODAS AS SIMULAÇÕES, COM ESTRATÉGIAS ISOLADAS E COMBINADAS	58
FIGURA 36 – RESULTADO PARA OS MODELOS DE ESTRATÉGIA PASSIVA EM DIAGRAMAS DE CAIXA	59
FIGURA 37 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA OS PARÂMETROS DAS ESTRATÉGIAS, REUNINDO TODOS OS RESULTADOS	60
FIGURA 38 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA OS PARÂMETROS FÍSICOS DA PAREDE	61
FIGURA 39 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA OS PARÂMETROS FÍSICOS DO PCM	62
FIGURA 40 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA OS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS E OPERACIONAIS DO PCM	63
FIGURA 41 – RESUMO DOS COEFICIENTES DE SPEARMAN DOS PARÂMETROS DAS ESTRATÉGIAS	64
FIGURA 42 – FILTRAGEM DOS PARÂMETROS DE ESTRATÉGIAS POR MEIO DE COORDENADAS PARALELAS	65
FIGURA 43 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE HORAS DE CONFORTO ADAPTATIVO PARA OS CASOS BASE E OTIMIZADO	66
FIGURA 44 – DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE PISO DO MODELO SIMPLIFICADO	84
FIGURA 45 – DIMENSIONAMENTO DA JANELA DA FACHADA FRONTAL	84

FIGURA 46 – DIMENSIONAMENTO DA JANELA DA FACHADA POSTERIOR _____	85
FIGURA 47 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA TIPOLOGIA ORIGINAL DAS PAREDES DA ESCOLA PADRÃO _____	85
FIGURA 48 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS VIDROS DAS JANELAS _____	85
FIGURA 49 – DADOS DE ENTRADA PARA A CONFIGURAÇÃO DOS ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL _____	86
FIGURA 50 – DIMENSIONAMENTO DA CHAMINÉ SOLAR INSERIDA NO MODELO COMPUTACIONAL _____	86
FIGURA 51 – DESENHO REPRESENTATIVO DAS EAHE COM TUBULAÇÕES EM PARALELO _____	89
FIGURA 52 – SECCIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES DO EAHE PARA CÁLCULO DE TRANSFERÊNCIA TÉRMICA E MÁSSICA _____	90
FIGURA 53 – DENSIDADE DE FREQUÊNCIA DOS MELHORES RESULTADOS POR PARÂMETROS PARA TODAS OS MODELOS DE ESTRATÉGIAS _____	91
FIGURA 54 – DENSIDADE DE FREQUÊNCIA DOS MELHORES RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS FÍSICOS DA PAREDE _____	92
FIGURA 55 – DENSIDADE DE FREQUÊNCIA DOS MELHORES RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS FÍSICOS DO PCM _____	93
FIGURA 56 – DENSIDADE DE FREQUÊNCIA DOS MELHORES RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS E OPERACIONAIS DO EAHE _____	94
FIGURA 57 – DIMENSIONAMENTO DO PISO DA SALA DE AULA 4 (TOPO), FACHADA POSTERIOR (CENTRO) E DIMENSIONAMENTO DA FACHADA FRONTAL (BASE) _____	95
FIGURA 58 – DIMENSIONAMENTO DA PORTA E JANELAS DA SALA DE AULA 4 _____	96
FIGURA 59 – TIPOLOGIA CONSTRUTIVA DA PAREDE EXTERNA (DIREITA) E DA COBERTURA (ESQUERDA) DO BLOCO PEDAGÓGICO 2 _____	96
FIGURA 60 – DETALHAMENTO DA COBERTURA DO BLOCO PEDAGÓGICO 2 _____	96

Tabelas

TABELA 1 – RESUMO DOS ARTIGOS REVISADOS	17
TABELA 2. COEFICIENTE DE PRESSÃO DAS SUPERFÍCIES COM ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO CRUZADA	48
TABELA 3. COEFICIENTE DE PRESSÃO DAS SUPERFÍCIES COM ABERTURAS PARA CHAMINÉ SOLAR	48
TABELA 4. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA CHAMINÉ SOLAR MODELADA	49
TABELA 5. PROPRIEDADES FÍSICAS DAS TIPOLOGIA CONSTRUTIVAS DE REFERÊNCIA	51
TABELA 6. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS TIPOS DE SOLOS APRESENTADOS NO SOFTWARE ENERGYPLUS	51
TABELA 7. DADOS DE SAÍDA DO PROGRAMA AUXILIAR CALC SOILSURFTEMP	52
TABELA 8. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E OPERACIONAIS DO EAHE	52
TABELA 9. MATRIZ DE DADOS DE SAÍDA DO CÓDIGO PARA AS CONDIÇÕES LÍMITES DE VAZÃO E DIÂMETRO	53
TABELA 10. CODIFICAÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS COM ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CLIMATIZAÇÃO ISOLADAS E INTEGRADAS	53
TABELA 11. ESCALA DE VALORES DOS PARÂMETROS AVALIADOS NA SIMULAÇÃO PARAMÉTRICA	55
TABELA 12. AVALIAÇÃO DAS FORÇAS DE CORRELAÇÃO	56
TABELA 13. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE MODELO COM VENTILAÇÃO CRUZADA E MODELO COM CHAMINÉ SOLAR	57
TABELA 14. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS TIPOS DE SOLOS APRESENTADOS NO SOFTWARE ENERGYPLUS	58
TABELA 15. TESTE DE TUKEY ENTRE AS DIFERENTES ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CLIMATIZAÇÃO	59
TABELA 16. QUADRO DAS FORÇAS DE CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS ESTRATÉGIAS	64
TABELA 17. PARÂMETROS DE ESTRATÉGIA QUE GERAM O 5º MAIOR VALOR DE POC PARA AS SIMULAÇÕES REALIZADAS	65

Abreviaturas e Siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE - Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado
ATC - Conforto Térmico Adaptativo
BIM - Modelagem da Informação da Construção
CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional
CODIN - Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura
COP – Coeficiente de Performance
EAHE - Trocadores de calor terra-ar
EERE - Departamento Americano de Eficiência Energética e Energia Renovável
FNDE - Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
HVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PAR - Plano de Ações Articuladas
PCM - Materiais de mudança de fase
PCS - Soluções de mudança de fase
PIR - Espuma rígida de poliacetato
PMV - Voto médio previsível
POC - Percentual de horas de conforto
PVC - Policloreto de vinila
RSL - Revisão Sistemática de Literatura
RTC – Conforto térmico adaptativo-razional

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	JUSTIFICATIVA	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2	REFERENCIAL TEÓRICO E NORMATIVO	6
2.1	INTRODUÇÃO ÀS ESTRATÉGIAS PASSIVAS DE CLIMATIZAÇÃO	6
2.2	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA - PROTOCOLO	8
2.3	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA - RESULTADOS.....	10
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE A RSL.....	17
2.5	ESTRATÉGIAS PASSIVAS: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	19
2.6	REFERENCIAL PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS OBJETOS	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL PRELIMINAR.....	45
3.2	COMPOSIÇÃO DOS MODELOS PASSIVOS	50
3.3	PROCESSAMENTO DE DADOS E RESULTADO GERAL	54
4	RESULTADOS	57
4.1	ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS PARA VENTILAÇÃO NATURAL	57
4.2	ANÁLISE DE INCERTEZAS	58
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	60
4.4	ANÁLISE DOS MELHORES RESULTADOS	65
4.5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	67
5	CONCLUSÃO	70
5.1	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	71
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICES	84
	APÊNDICE A – MODELAGEM COMPUTACIONAL DESIGNBUILDER	84
	APÊNDICE B – MODELAGEM MATEMÁTICA DO EAHE	87
	APÊNDICE C – DENSIDADE DOS PARÂMETROS PARA OS MELHORES CASOS	91
	ANEXOS	95
	ANEXO A – COTAGEM DE DIMENSÕES	95

1 Introdução

A Agenda 2030, um plano de ação que indica 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), além de 169 metas, elegeu a educação (objetivo 4) como um dos meios para permitir uma vida digna, uma vez que a educação exerce importante papel no desenvolvimento da dignidade da pessoa humana, e todas as condições que contribuem para seu avanço devem ser promovidas.

Em seu item “4.c”, a Agenda propõe “construir e melhorar instalações físicas para educação, apropriadas para crianças e sensíveis às deficiências e ao gênero e que proporcionem ambientes de aprendizagem seguros, não violentos, inclusivos e eficazes para todos” (UNITED NATIONS, 2015). Com isso, edificações educacionais devem prover um ambiente adequado para que as capacidades intelectuais possam ser desenvolvidas de forma eficaz.

O ambiente educacional se comunica com o seu ocupante, expondo valores, construindo normas sociais e possibilitando o desenvolvimento de hábitos e condutas. Segundo Elali (2003, p. 310), além da mobília e sua disposição espacial, “as condições ambientais da classe (acústica, temperatura, insolação, ventilação, luminosidade) podem refletir-se em fatores tão diversos quanto a sociabilidade dos usuários, seu desempenho acadêmico e mesmo sua saúde”.

Assim, proporcionar um ambiente confortável, através de adequadas condições térmicas, lumínicas e acústicas, potencializa a participação, aprendizagem e ensino de seus usuários. Entretanto, o manejo das condições ambientais não se exaure a atingir os valores físicos de conforto determinados, tendo a tecnologia empregada uma oportunidade para desenvolver a responsabilidade e comprometimento com o desenvolvimento sustentável.

Para o controle das condições de conforto ambiental térmico, a tendência é a seleção de soluções de climatização ativa, como aparelhos de ar-condicionado, pela sua facilidade de instalação e operação. Uma das informações necessárias para o dimensionamento do ar-condicionado é a carga térmica, que é a quantidade de calor que precisa ser retirada ou fornecida, em determinado tempo, para que as condições ambientais desejadas sejam atingidas (MENEZES, 2005).

A carga térmica está diretamente relacionada com a seleção do ar-condicionado e seu consumo energético operacional, assim quanto maior a redução de carga térmica, menor a necessidade do uso de soluções ativas de climatização. E essa diminuição se dá graças a um projeto arquitetônico que se utiliza de diversas medidas de conservação de energia e estratégias passivas de climatização.

A climatização passiva utiliza propriedades ambientais do sol, do céu, da atmosfera e do solo, para a moderação de temperatura. Seu uso possui a característica de baixo ou nenhum consumo energético. Além disso, estudos mostram que o uso de soluções passivas podem prover um excelente conforto térmico, além de uma boa qualidade do ar interno, ambos por um baixo consumo energético (JOMEHZADEH *et al.*, 2017).

As soluções passivas de climatização consistem no ato de climatizar sem ter um consumo energético, aproveitando as condições naturais para a criação e manutenção de um microclima. A origem destas soluções vem desde o início da relação do ser humano e sua habitação, através da arquitetura vernacular, que ensina “técnicas, conceitos e princípios bioclimáticos e sustentáveis que podem ser empregados em

edificações que persigam a alta eficiência energética” (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014, p. 24).

A arquitetura bioclimática preocupa-se em aproveitar alguns eventos naturais como a radiação solar, correntes de ar, chuva ou inércia térmica para promover ventilação, iluminação, umidificação, resfriamento e aquecimento, com o objetivo de proporcionar conforto térmico. Seu objetivo é basicamente diminuir a carga térmica do ambiente, para diminuir a necessidade de sistemas mecânicos e manter certas condições ambientais.

Outras soluções passivas são recursos tecnológicos utilizados pela sociedade há séculos, como torres de vento, poços provençais, chaminés térmicas etc. Tais elementos utilizam forças motrizes naturais para gerar, dentro do edifício, ventilação cruzada, diferença de pressão, climatização por inércia geotérmica, de forma integrada ao projeto arquitetônico do edifício.

Principalmente pelo uso de ventilação natural através de aberturas na edificação, as soluções passivas de climatização têm sido usualmente aplicadas em ambientes escolares. Porém janelas e venezianas são apenas uma das abordagens possíveis, tendo inúmeras outras soluções que previnem e modulam o ganho de calor, além de dissipá-lo. De fato, a sua implementação depende de uma análise muito mais detalhada do clima local, materiais disponíveis, mão-de-obra experiente, além de sua integração com a cultura e comportamento de seus usuários, algo constantemente trabalhado na arquitetura vernacular (ABRO, 1994), e que contribui com uma edificação adequada a sua regionalidade e contexto climático.

Aliado a isso, além das questões sobre qualidade e controle ambiental do ar, mesmo com os desafios de seu projeto, escolas que utilizam elementos de climatização sustentáveis podem utilizá-los como ferramentas formais e informais no desenvolvimento educacional de estudantes, através de um maior engajamento em questões ambientais (TUCKER e IZADPANAHI, 2017). Assim, o uso de uma ou mais soluções passivas integradas em edificações educacionais pode contribuir social e economicamente com a sua comunidade.

A instalação de elementos passivos para a climatização, devido à falta de incentivo à pesquisa e desenvolvimento, muitas vezes se resume a sistemas com apenas uma solução empregada, porém cada elemento possui suas particularidades e funções dependentes de condições climáticas e físicas (BRITTLE; EFTEKHARI; FIRTH, 2018). Por exemplo, enquanto um elemento possui a função de estabilizar a variabilidade da temperatura ao longo do dia, como as soluções que utilizam energia geotérmica, outros funcionam para resfriar ou aquecer o ar interno, como os que utilizam as trocas de calor latente pelo uso de água ou aparatos solares.

Assim, a integração de soluções passivas possui o potencial de aumentar significativamente a habilidade de atingir as demandas energéticas necessárias para atingir o conforto térmico em uma edificação habitada (ALEMU, 2013). Com isso, o presente estudo busca contribuir com a conscientização dos benefícios e oportunidades que as soluções passivas podem oferecer, e aumentar a confiança no uso de tais soluções quando integradas, para que sua aplicação se torne cada vez mais comum em edificações educacionais e, como extensão, em edificações em geral.

1.1 Objetivos

Objetivo Geral

O principal objetivo deste projeto é avaliar a influência de estratégias passivas de climatização por dissipação e modulação de calor, isoladas e integradas, no conforto térmico de uma sala de aula inserida no contexto climático de Brasília.

Objetivos Específicos

- Selecionar estratégias passivas adequadas, por meio de uma revisão sistemática de literatura, para climas quentes;
- Selecionar a estratégia passiva de ventilação, entre ventilação cruzada e chaminé solar, que possui melhor resultado de conforto térmico;
- Investigar se o uso de diferentes modelos de integração de estratégias, isoladas e combinadas, possuem diferença significativa no conforto térmico;
- Avaliar as correlações entre os parâmetros construtivos das estratégias e o conforto térmico;
- Otimizar os modelos de integração de estratégias para maximizar o número de horas em conforto.

1.2 Justificativa

A aplicação de soluções passivas em edificações era comum até antes do advento de máquinas capazes de tratar termicamente o ar apenas com o uso de trabalho externo por motores. Assim, até meados dos anos 70, a pesquisa e o desenvolvimento de estratégias de climatização estavam focados majoritariamente em soluções ativas. Após a crise do petróleo, temas como eficiência energética e desenvolvimento sustentável se tornaram pauta no mundo acadêmico, e os meios passivos de climatização voltaram a discussão pela sua potencialidade na redução do consumo energético.

Hoje, diversos estudos e pesquisas sobre elementos passivos individuais estão disponíveis, tendo sido investigadas analítica, descritiva e experimentalmente. Para sistemas integrados, onde se utiliza mais de um elemento em interação, pesquisas tem se mostrado mais comuns a partir dos anos 2000, sendo que tal dilatação pode ser explicada pela alta complexidade no desenvolvimento de modelos e necessidade de análise de múltiplas variáveis envolvidas. Assim, o tema tem se mostrado atual e promissor, ainda necessitando uma ampla investigação para sua segura compreensão.

No Brasil, percebe-se certa tendência nesses estudos, sendo as estratégias de modulação e prevenção de calor (como o estudo do microclima, forma, envelopamento e dispositivos da edificação etc.) se concentrando em edificações habitadas, tendo mais interesses por arquitetos e urbanistas; e as estratégias de dissipação de calor (como trocadores de calor solo-ar, resfriamento evaporativo, chaminés solares, etc), com exceção da ventilação natural, se concentrando em edificações de uso não residencial, tendo mais interesses por engenheiros. Tal tendência pode ser explicada pelo próprio objeto estudado, sendo que o primeiro é normalmente parte integrante da edificação, e o segundo é um dispositivo alocado na edificação.

Entretanto, tal divisão limita o potencial de pesquisa do tema, pois uma participação multidisciplinar pode gerar pesquisas criativas e de alto impacto, além de possibilitar descobertas científicas inusuais (BHAVSAR, 2017). Da mesma forma, o uso de

estratégias de modulação, prevenção e dissipação de calor possuem sinergia entre si, e podem ser integradas em edificações habitadas e não habitadas. Para isso, a cooperação entre engenheiros e arquitetos, mas também profissionais de outras áreas, contribui para a pesquisa e desenvolvimento de soluções passivas de climatização.

Estratégias passivas de climatização, quando inseridas em climas com estações bem definidas, normalmente possuem temperaturas do ambiente próximas às de conforto. Isso gera maior facilidade em aproveitar meios naturais de climatização. Contudo, estratégias passivas inseridas em climas quentes podem também atingir o conforto térmico, utilizando soluções há séculos conhecidas, como torres de vento e resfriamento evaporativo, mas agora com projetos baseados em pesquisas (OMER, 2008).

Além das soluções tradicionais, novas tecnologias têm surgido para contribuir com a climatização de baixo ou zero consumo energético, como os materiais de mudança de fase e resfriamento dessecante, sendo que tais soluções contribuem para o surgimento de sistemas majoritariamente passivos para climatização de edificações em regiões de clima quente, pois aproveitam de oscilações não mais sazonais, mas diárias e outras condições climáticas, como a baixa e alta umidade relativa. Porém tais sistemas ainda necessitam de ampla investigação para que seu comportamento seja previsível, e que sua produção industrial possa ser possível em larga escala, além da necessidade de confirmação das melhores soluções para cada contexto climático.

Associado às mudanças de paradigmas sobre conforto térmico, alto consumo energético, e problemas de salubridade pelo uso de sistemas ativos, a tendência de mudança para o uso de sistemas passivos tem se mostrado cada vez mais acentuada. Porém, a falta de confiabilidade e previsibilidade do comportamento dessas soluções tem limitado sua aplicação em edificações habitadas, já que as necessidades de conforto térmico requerem faixas de atendimento rígidas, e os sistemas ativos conseguem manter valores de condições ambientais bastante específicos, com um bom controle de variação. Esse comportamento incerto tem sido reduzido graças ao uso de técnicas computacionais e ao avanço de estudos estatísticos.

Modelos matemáticos de transferência de calor tem conseguido prever o desempenho térmico das soluções passivas, e sua simulação através de softwares consegue reduzir o número de variáveis desconhecidas a um nível aceitável. Isso contribui com a aplicação dessas estratégias em escala projetual, pois o comportamento térmico dos sistemas de climatização passiva pode ser inserido na modelagem computacional de edificações, convergindo seus desempenhos através da realização de cálculos numéricos complexos, possíveis com os avanços da computação. Novos softwares de modelagem e simulação têm surgidos todos os anos, e sua aplicação e averiguação de performance para o uso de novos sistemas necessitam de constantes estudos, tanto para validação quanto para entendimento do uso de suas ferramentas.

Outro desafio está na inserção dessas técnicas no projeto arquitetônico da edificação. Por exemplo, a chaminé solar possui variáveis como seus ângulos de inclinação e orientação, posicionamento de sua entrada dentro do ambiente interno, entre outras características de projeto que devem estar coesos com a arquitetura do prédio. Assim, sua execução deve estar em cooperação com o ambiente construído, considerando propriedades quantitativas e qualitativas.

Para o caso de sua aplicação em ambientes escolares, é necessário pensar também na interação entre as estratégias passivas e seus usuários como oportunidade de desenvolvimento da consciência para um consumo sustentável, além de envolver características particulares do ambiente, como exemplo escala e densidade de

ocupação e, semelhantemente, como o contexto climático em que a edificação está inserida influencia nas estratégias utilizadas (ainda mais para climas quentes, secos e úmidos, que são majoritariamente os climas do Brasil, país relevante para esse estudo).

Assim, é de interesse conhecer as melhores soluções passivas para cada circunstância projetual, envolvendo aprendizado nas decisões de integração do sistema de climatização com a edificação e nas suas interações com o usuário e seu ambiente, no caso em espaços educacionais.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho possui 6 capítulos que particionam de uma forma lógica o desenvolvimento da pesquisa: Introdução, Apresentação e Discussão da Proposta, Referencial Bibliográfico, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão, Conclusões.

O capítulo 1 – Introdução – contextualiza o tema que será apresentado e define os objetivos (geral e específicos) da pesquisa. Além disso, justifica a escolha do tema apresentado, expondo motivações e argumentos e identificando as possíveis contribuições de pesquisa. Finaliza expondo a estruturação do trabalho.

O capítulo 2 – Referencial teórico e normativo – situa o estado da arte para a combinação de estratégias passivas de climatização (tendo base um trocador de calor solo-ar), por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura. A revisão servirá de base para a seleção das estratégias passiva, tendo um aprofundamento no referencial teórico para cada estratégia selecionada. Também será definido os outros objetos de estudo: sala de aula, contexto climático de Brasília, além do referencial para os métodos.

O capítulo 3 – Materiais e Métodos – descreve os dados de entrada e como serão aplicados ao modelo, detalha a seleção de parâmetros que serão utilizados para a modelagem do sistema, e apresenta as etapas que devem ser cumpridas para a obtenção dos dados de simulação. Também apresenta diretrizes dos softwares utilizados e os modelos analíticos e computacionais das soluções passivas que serão aplicadas. Finaliza apresentando como os dados serão apresentados e analisados.

O capítulo 4 – Resultados e Discussão – entrega, em gráficos e tabelas, os dados simulados nas etapas propostas pelo método. Seus resultados são confrontados com o controle definido e entre si, para avaliar a rejeição de hipóteses de pesquisa e iniciar a discussão sobre seu potencial de aplicação em ambientes educacionais, focando nos resultados de conforto térmico. A discussão será realizada com base no referencial bibliográfico para que se identifique convergências ou divergências com outros estudos.

O capítulo 5 – Conclusão – faz um resumo da dissertação, apresentando as informações essenciais de cada capítulo. Apresenta os resultados obtidos mais relevantes e a rejeição de hipóteses, além de propor trabalho futuros.

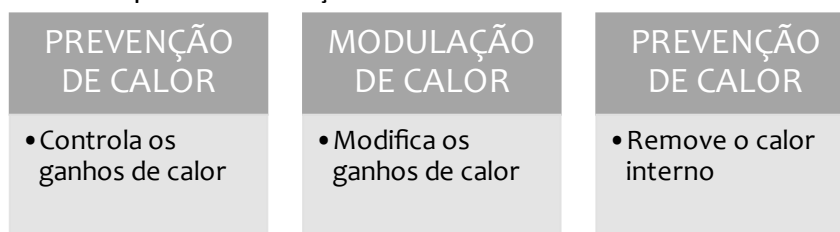
2 Referencial Teórico e Normativo

2.1 Introdução às Estratégias Passivas de Climatização

Climatização pode ser descrita como o conjunto de procedimentos utilizados para obter condições ambientais de umidade, pressão, temperatura, em recinto fechado, para dar bem-estar a seus usuários (CLIMATIZAÇÃO, 2021). As soluções de climatização podem ser classificadas em três grandes grupos: sistemas ativos, sistemas passivos e sistemas híbridos. Os sistemas ativos funcionam pelo ciclo de refrigeração, um sistema térmico que continuamente transfere energia térmica (calor) de uma região de baixa temperatura para outra em alta temperatura.

Como este fluxo contraria a tendência natural da transferência de calor, esse só é possível absorvendo trabalho externo. Já as estratégias passivas não necessitam de trabalho externo para seu funcionamento, pois utilizam fenômenos naturais, como a radiação térmica e evaporação, ou mesmo a transferência de massa e calor por meios que já estão na temperatura desejada, como o solo ou ar atmosférico. As soluções híbridas é o uso dessas duas estratégias apresentadas. A Figura 1 apresenta os tipos utilizados para a estratégias passivas de climatização de edificações.

Figura 1 – Tipos de sistemas passivos de climatização

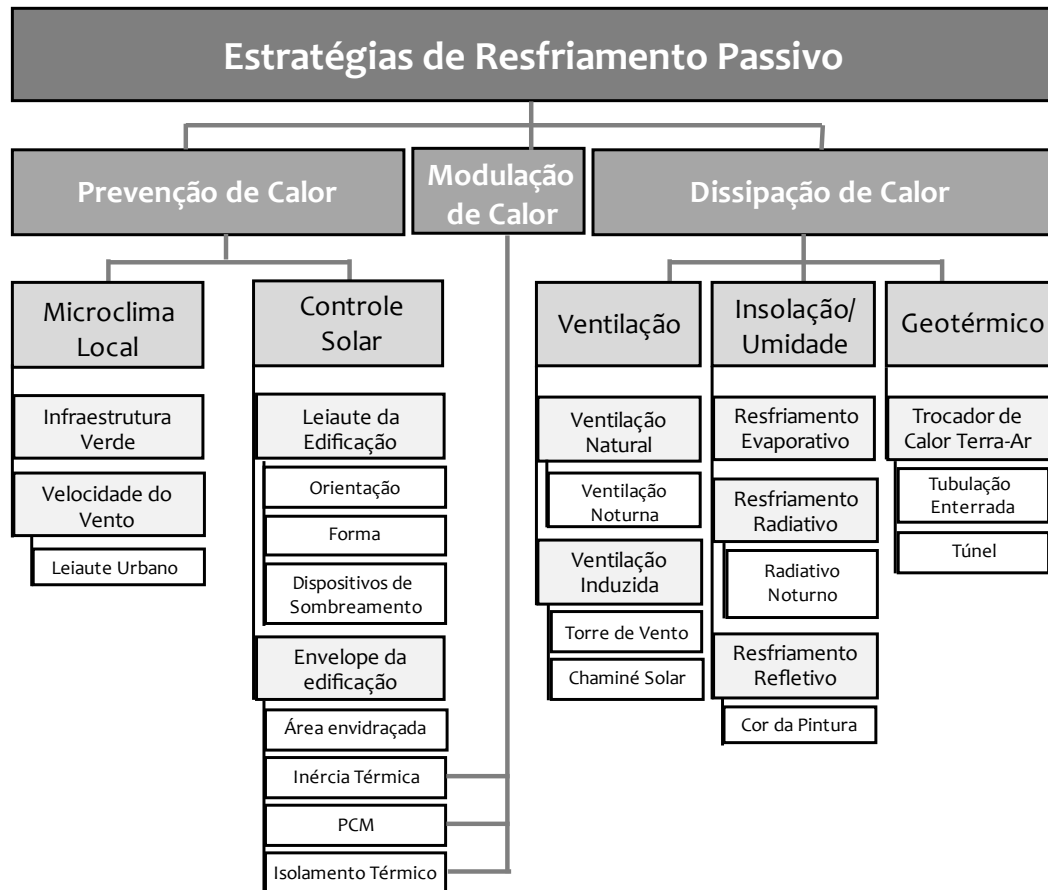


Fonte: (AKEIBER *et al.*, 2016). Adaptada

O resfriamento passivo pode ser praticado através de técnicas, como o controle de calor e incidência de radiação solar direta, dissipação de calor e modulação de calor (Figura 2). A primeira lida com a mitigação dos ganhos de calor através do uso de vegetação, sombreamento, orientação da edificação, uso de materiais transparentes no envelope, como vidro, isolamento térmico, entre outras soluções comumente relacionadas no projeto arquitetônico da edificação para atingir seus critérios de desempenho térmico e, conseqüentemente, reduzindo sua carga térmica. A segunda e a terceira são técnicas mais complexas, utilizando-se, muitas vezes, de elementos de climatização não integrados diretamente a fachada da edificação ou de fenômenos naturais e seu aproveitamento energético para remover o excesso de calor do ambiente interno.

A dissipação de calor pode ser realizada através da interação entre o solo e o ar circulante do ambiente externo ao interno; do uso de ventilação natural por aberturas, ou mesmo trocas mais controladas por chaminés solares e torres de ventos; também se aproveita o uso da água, utilizando seu processo de evaporação direta ou indiretamente através de aspersores em diferente sistema ou da passagem de ar em placas evaporativas. Já a modulação de calor envolve no aproveitamento da inércia térmica de certos materiais, considerando sua condutividade térmica, ou o uso de seu armazenamento térmico latente, com a aplicação de materiais de mudança de fase.

Figura 2 – Estratégias passivas de climatização agrupadas em tipos de sistemas



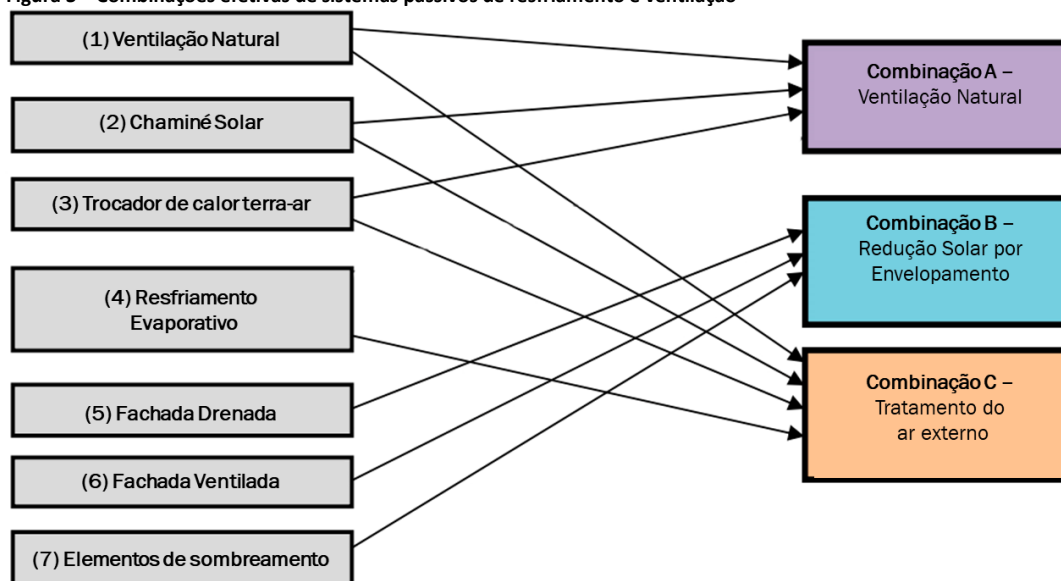
Fonte: (VALLADARES-RENDÓN; SCHMID; LO, 2017). Adaptada

Muitas pesquisas têm sido conduzidas com intuito de desenvolver e avaliar o impacto de elementos passivos isolados na ventilação e climatização do ambiente. Porém, cada elemento possui suas particularidades e funções dependentes de condições climáticas e físicas (BRITTLE; EFTEKHARI; FIRTH, 2018). Por exemplo, enquanto um elemento possui a função de estabilizar a variabilidade da temperatura ao longo do dia, outro funciona para aumentar as trocas de ar do ambiente.

Assim, é necessário um estudo mais aprofundado sobre os impactos de estratégias passivas integradas em um mesmo ambiente de controle, a fim de avaliar o potencial máximo do uso de tais elementos, em um sistema totalmente passivo e autônomo. Porém, existem dificuldades em alcançar resultados consistentes na avaliação de desempenho desses elementos integrados, devido à complexidade de modelagem do problema e dependência de fatores ambientais externos (CLARKE, 2001).

Contudo, pelo surgimento de ferramentas computacionais robustas, modelos mais seguros estão sendo criados, podendo ser simulados de forma controlada por programas de computador e validados por novas tecnologias, como sensores e coletores de dados em aparatos experimentais.

Figura 3 – Combinações efetivas de sistemas passivos de resfriamento e ventilação



Fonte: (BRITTLE, 2017)

A Figura 3 mostra diferentes tipos de combinações de elementos passivos de climatização. A combinação “A” é para um sistema de insuflamento de ar externo, a combinação “B” é para a proteção do envelopamento contra ganhos de calor, e a combinação “C” é para o controle de fluxo de ar com o ajuste de umidade relativa. O interesse deste presente trabalho é:

- sistemas que envolvam a modulação de calor e a dissipação de calor, excetuando-se as soluções de resfriamento evaporativo e solar, por serem soluções que possuem sistemas mecanicamente complexos.

Assim, para obter uma visão ampliada da produção científica para este tema, uma metodologia de revisão será aplicada, com o intuito de mapear a produção científica dos últimos anos para a integração de elementos passivos com um EAHE, que será o elemento chave dessa análise preliminar, pois tem sido amplamente utilizado tanto em pesquisas quanto para estudos de caso no uso de estratégias passivas para o arrefecimento de uma edificação e comumente integrado a outros elementos passivos ou ativos de arrefecimento, o que será visto na próxima sessão de pesquisa.

2.2 Revisão Sistemática de Literatura - Protocolo

O método utilizado para esta seção foi a revisão sistemática da literatura cuja seleção e classificação dos artigos foi feita por meio do software StArt, programa nacional, de uso livre e gratuito além de permitir um trabalho colaborativo, fatores ponderados também por Costa; Logsdon e Fabricio (2018). O objetivo da RSL pode ser resumido como mapear, avaliar criticamente, consolidar e agregar resultados de estudos primários, para a identificação de ênfases, tendências evidências e lacunas de pesquisa, conforme ponderado por Ruschel *et al.* (2017).

Segundo Gough, Oliver e Thomas (2017), a RSL é importante pois evita o embasamento apenas em pesquisas pontuais que podem apresentar falhas, e fornece um quadro mais abrangente baseado em diversas fontes de estudos. Além disso, propicia um contexto das pesquisas anteriores já realizadas a fim de evitar que novas pesquisas sejam desnecessárias, inapropriadas, irrelevantes ou antiéticas. Esta revisão adotou o delineamento de Kitchenham (2004), que divide a RSL em três fases principais: planejamento (identificação da necessidade da revisão e desenvolvimento do protocolo

com os questionamentos da pesquisa); condução da revisão (seleção dos estudos, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão para refinar a amostra); e análise dos resultados (sumarização e discussão dos principais resultados).

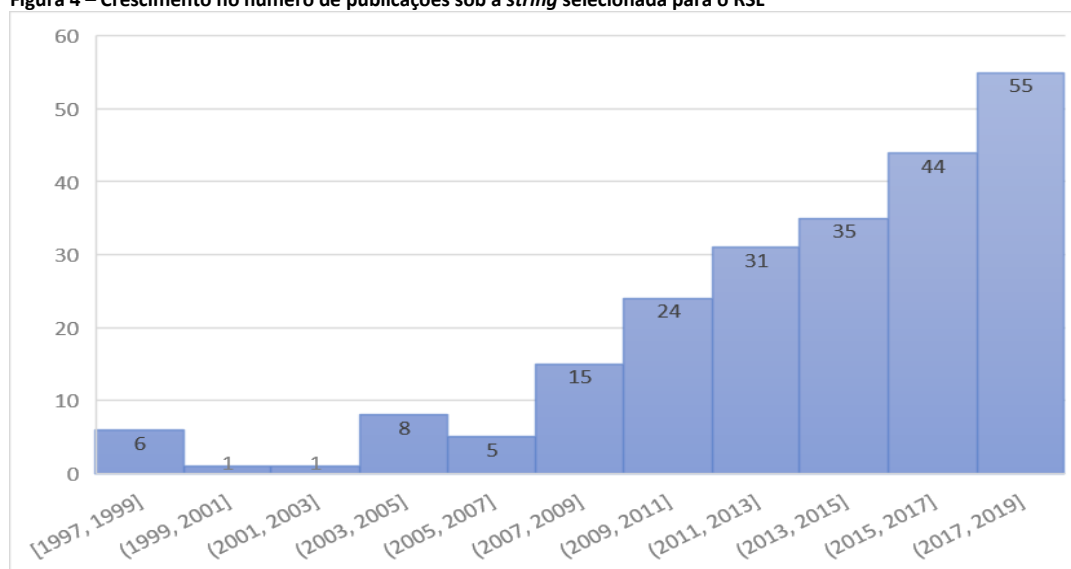
A pesquisa foi feita na base de dados Scopus com a seguinte string de busca e operadores booleanos: TITLE-ABS-KEY(("air ground heat exchanger" OR "ground air heat exchanger" OR "air to ground heat exchanger" OR "ground to air heat exchanger" OR "earth air" OR "air earth" OR "earth-to-air heat exchanger" OR "earth to air" OR "earth-to-air" OR "air to earth" OR "air-to-earth" OR "air-to-earth heat exchanger" OR "GAHE" OR "GAHX" OR "AGHX" OR "EAHE" OR "EAHX" OR "ETAHE" OR "ATEHE" OR "HEAHE" OR "VEAHE" OR "ETAHX" OR "ATEHX" OR "HEAHX" OR "VEAHX" OR "earthtube" OR "earth-tube" OR "earth tube" OR "ground-coupled heat exchanger") AND (hybrid OR coupl* OR combin* OR connec* OR integr* OR compound OR incorpor* OR join* OR link* OR unite* OR mesh* OR arrange* OR incorporate*). Tal string foi desenvolvida pensando nas perguntas principais da pesquisa, que são:

- Quais as estratégias de climatização são integradas com um EAHE?
- Qual o desempenho térmico do EAHE quando integradas tais estratégias?
- Quais os desafios de sua aplicação em uma edificação?

Optou-se pela escolha apenas da Scopus a partir dos estudos de Chadegani *et al.* (2013), em que afirmam que essa base por si só cobre um número superior de periódicos e possui atualização diária, retornando possivelmente um maior número de artigos para a RSL. Embora seja ponderado que está limitada a artigos mais recentes, sabe-se que os PCMs, foco desse trabalho, são relativamente novos, não atrapalhando a RSL desenvolvida.

A busca não foi limitada a nenhum intervalo temporal para que se pudesse determinar a partir de quando foram iniciadas as publicações científicas com essa ênfase, sendo assim o artigo mais antigo datado de 1997 (porém artigos mais antigos podem ser encontrados através de uma busca manual, ou do tipo *snowball*), antes da aplicação dos critérios de exclusão, o que demonstra que esse tema é pesquisado há mais de 20 anos, e com sua frequência em pleno crescimento nos últimos 10 anos. A Figura 4 mostra essa evolução, somente para os artigos selecionados:

Figura 4 – Crescimento no número de publicações sob a string selecionada para o RSL



Fonte: O autor

A lógica estabelecida para as exclusões deve-se ao contexto já descrito anteriormente e à necessidade de alinhar a RSL às intenções dessa pesquisa, mais voltada para a avaliação de sistemas integrados com estratégias de climatização que utilizam EAHE que por sua natureza utiliza o ar como meio de fluido, assim excluindo sistemas de bombas de calor, e qualquer sistema que utilize água como fluido, pois necessita de bombas mecânicas para seu funcionamento.

Com as *strings* propostas, a Scopus retornou 550 artigos. O processo de seleção ocorreu primeiramente com a leitura do título de artigo e seu resumo. Os critérios para seleção era o foco do artigo ser na análise do EAHE com algum outro elemento de climatização integrado a ele, tendo de ser em uma edificação residencial, comercial ou pública. Sistema que possuía apenas um elemento ou mais de uma solução na edificação, porém não integrada ao EAHE foram excluídas, sem contar com as publicações que não possuíam nexos com o tema.

Os critérios de exclusão inicialmente colocadas foram o tipo de artigo, se for apenas de revisão (porém estes foram utilizados para averiguação de qualidade dos critérios de seleção) e a análise ter sido em regiões não tropicais ou frias. Após essa seleção, restaram 125 artigos. Assim, a segunda iteração ocorreu com a leitura do corpo do artigo, avaliando se o artigo estava de acordo com as perguntas de pesquisa.

Assim, com a segunda iteração, percebeu-se que os artigos estavam de acordo com os primeiros critérios de inclusão e exclusão, porém certos artigos investigavam estratégias que integravam EAHE com recuperadores de energia, ou mesmo apenas ar-condicionado. O foco dessa revisão é para sistemas sobretudo passivos, onde se utiliza minimamente o uso de ventiladores ou qualquer outro elemento mecânico.

Assim, após a etapa de extração, 41 artigos estavam de acordo com todos os critérios estabelecidos pelo protocolo de revisão, após avaliação de título, resumo e corpo do artigo. Para essa revisão, foram selecionados 18 artigos desses 41 que eram provindos de revistas de alto impacto e que possuem resultados mais confiáveis e claros de serem trabalhados. Não ocorreu nenhuma seleção especial por tipo de solução integrada, apenas foi observado a qualidade do artigo publicado.

2.3 Revisão Sistemática de Literatura - Resultados

Após a seleção dos artigos, segue-se para a extração de dados, sendo o principal foco a obtenção do desempenho térmico dos sistemas integrados. No total, serão 18 artigos resumos, extraindo as estratégias integradas ao EAHE, sua metodologia, localização para identificação das condições climáticas da região e os resultados encontrados. Com isso, espera-se ver a potencialidade que esses sistemas possuem em arrefecer uma edificação e manter seu conforto térmico, além de estudos de casos que já implementaram pelo menos parte desses sistemas.

Chaminé solar

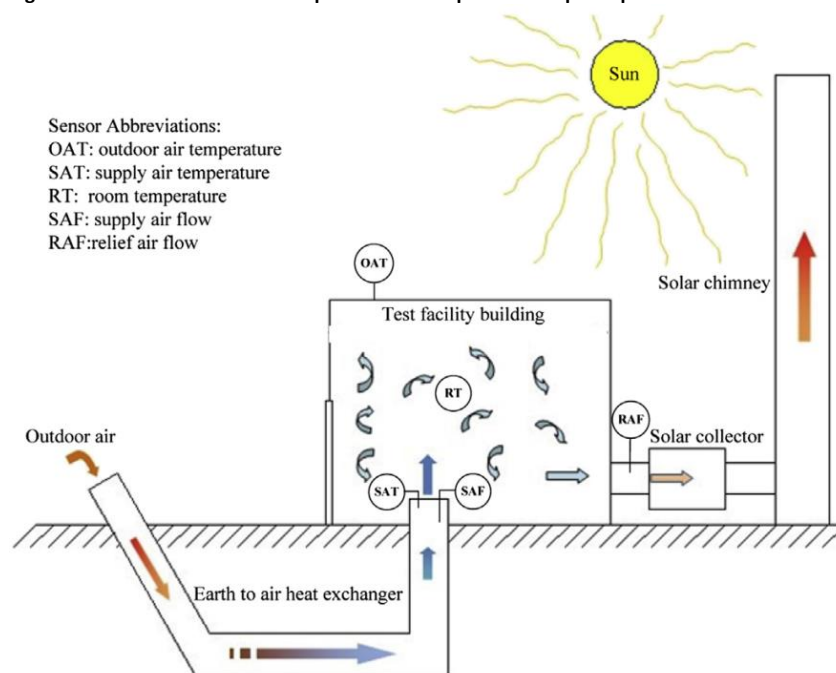
Serageldin, Abdelrahman e Ookawara (2018) procuraram otimizar o desempenho de uma chaminé solar conectado a um EAHE, através de um estudo paramétrico. Para isso, foi desenvolvido um modelo experimental, localizado no Egito, e seus dados obtidos foram inseridos dentro de um modelo computacional, utilizando CFD para validar os modelos desenvolvidos. Como objetivo os pesquisadores buscaram examinar a temperatura interna do ambiente, a temperatura da chaminé e do EAHE, a velocidade do ar dentro do sistema, além de relacioná-los com os dados meteorológicos da localidade, no caso, o Egito. Assim, obteve-se que a chaminé solar pode prover ventilação suficiente para o ambiente, com as configurações construtivas certas. No

caso da lacuna da chaminé, seu decremento é positivo, sendo para esse caso um valor de 20 cm o ideal, com uma largura de 1 metro e comprimento de 2 metros, com um ângulo de 30°.

Kaushal et al. (2015) desenvolveram um modelo matemático de números finitos para avaliar e otimizar o desempenho térmico de um EAHE conectado a uma chaminé solar, simulados nas condições climáticas do noroeste da Índia. O modelo foi inserido no software ANSYS, e foi validado com dados obtidos em outros estudos prévios, utilizando a metodologia de superfície de resposta para analisar e otimizar as variáveis envolvido no problema. O resultado obtido mostrou que ocorre uma queda de pressão mínima na combinação das duas estratégias passivas e não foi necessitado um ventilador para o ar circular no sistema.

Li et al. (2014) construíram uma sala de testes para avaliar a potencialidade de condicionamento do ar com um sistema passivo de climatização, utilizando um EAHE conectado a uma chaminé solar (Figura 5). O aparato experimental demonstrou que, com o sistema, o ambiente permaneceu dentro da faixa de conforto térmico entre 21,3 e 25,1°C, com uma umidade entre 50 e 78%, na cidade de Omaha, Estados Unidos. A capacidade máxima de arrefecimento do EAHE foi de 3308 W, e com a chaminé conectada foi de 2582 w, sendo que o aumento da temperatura externa e radiação solar contribui para a capacidade de resfriamento do sistema. Já o aumento de fluxo de ventilação pode reduzir o desempenho do sistema.

Figura 5 – Sala de teste arrefecido por um sistema passivo composto por EAHE e chaminé solar



Fonte: Li et al. (2014)

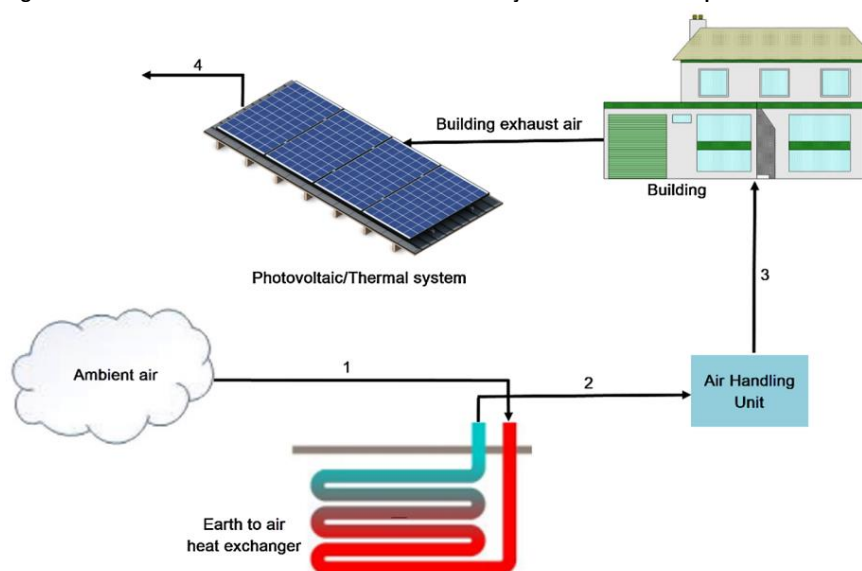
Maerefat e Haghighi (2010) conectaram um EAHE e uma chaminé solar numa edificação para determinar sua capacidade de condicionar o ambiente passivamente, sem o uso de ventiladores mecânicos. Assim, um modelo matemático em regime permanente simulou o comportamento térmico da edificação, para a cidade de Teerã, Irã, podendo variar diversos parâmetros de configurações tanto da chaminé solar quanto do EAHE. Assim, os pesquisadores encontraram que quanto maior a altura da chaminé, mais tubulações devem ser instaladas no EAHE para administrar a temperatura interna do ambiente em uma faixa de conforto. As tubulações também possuem um diâmetro

otimizado de 0,5m que resultam numa menor necessidade de tamanho da chaminé solar e EAHE. O sistema também pode condicionar o ar do ambiente mesmo em condições de pouca radiação solar e altas temperaturas externas, provendo boas condições térmicas internas.

Placa fotovoltaica

Afrand et al. (2019) analisaram o comportamento de um sistema de pré-aquecimento e pré-arrefecimento, com um EAHE conectado a uma placa fotovoltaica (Figura 6). No inverno o EAHE será responsável pelo aquecimento da placa, e no verão o EAHE estará conectado diretamente à edificação, com o ar de exaustão resfriando a placa, para as condições climática da cidade de Quermanxa, Irã. O autor usou de um modelo analítico de uma dimensão em regime permanente para obter as temperaturas do ambiente interno da edificação e da placa fotovoltaica, além de avaliar os ganhos energéticos que mudanças de configuração do sistema ofertam. Assim, o ganho anual de energia térmica e elétrica é de 3500 e 6000 kwh, respectivamente. O aumento de comprimento e diâmetro das tubulações do EAHE contribuem no desempenho do sistema, e sua vazão volumétrica diminui na média anual de sua performance.

Figura 6 – Sistema de arrefecimento EAHE de uma edificação conectado a uma placa fotovoltaica



Fonte: Afrand et al. (2019)

Parede trombe

Badawiyeh, Ghaddar e Ghali (2017) utilizaram uma parede trombe para induzir fluxo de ar provindo de um sistema de EAHE. Os autores desenvolveram um modelo matemático em regime transiente, desenvolvido no software Matlab, sendo simulado para o clima semiárido do Líbano. Os resultados obtidos demonstram que durante o dia, a demanda de arrefecimento do ar é alcançada. Ao meio-dia a taxa de fluxo de ar máxima é atingida, sendo que a diferença de temperatura entre o ambiente e o ar de saída do EAHE é entre 1,3 e 7,2°C para o mês de junho. O número de horas de desconforto para esse mês é de 60h, e sua economia de energia pode chegar a 2,02 kWh/m², com um retorno econômico em menos de 4 anos.

Massa térmica

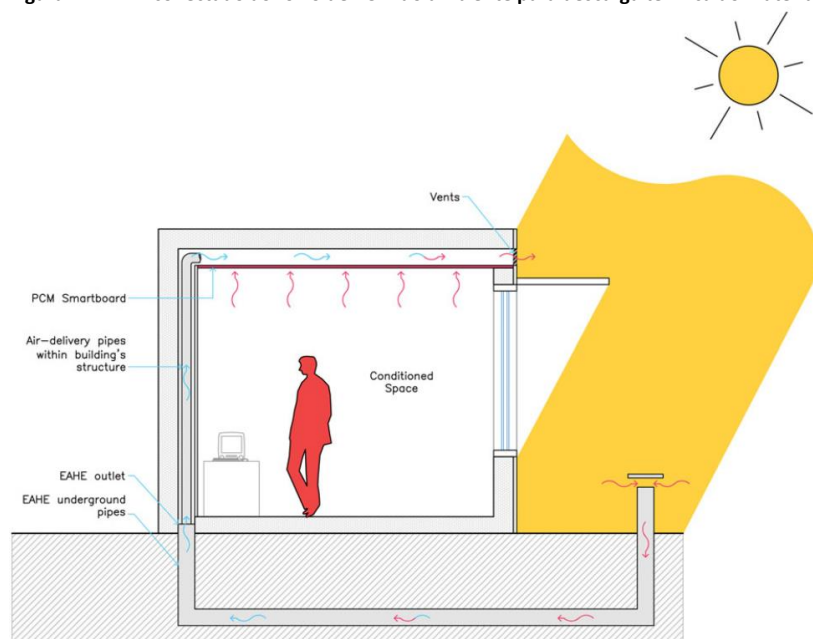
Yang e Zhang (2015) pesquisaram o comportamento da flutuação de temperatura interna de uma edificação que utiliza EAHE como sistema de arrefecimento. Essa flutuação estará diretamente ligada a massa térmica da edificação, sendo desenvolvido

um modelo matemático 2D em regime transiente, com um aparato experimental para validá-lo, num contexto climático quente da cidade de Chongqing, China. Os resultados validaram o modelo matemático, mostrando a integração da massa térmica com o EAHE contribui com a prolongamento do atraso térmico, sendo um aumento do isolamento térmico da edificação um fator benéfico ao desempenho do sistema integrado. Assim, o sistema pode contribuir para a diminuição do uso de ar-condicionado, tendo cuidado no projeto para que o excesso de atraso térmico não seja desfavorável ao conforto.

Material de mudança de fase

Liu et al. (2019) investigaram o uso de materiais de mudança de fase integrados na tubulação de um EAHE, e sua influência no desempenho do trocador de calor. O sistema foi analisado para um contexto climático subtropical, na cidade de Changsha, China. Os autores desenvolveram um modelo número em regime transiente, tendo sido validado baseado em dados experimentais obtidos em escala real. O erro absoluto máximo foi de 1,59% e 1,34 para a temperatura de saída e a temperatura do PCM. Como resultado, o uso de PCM em EAHE pode diminuir a amplitude da temperatura de saída em 30%, e a espessura do material influencia no desempenho do sistema consideravelmente quando abaixo de 5mm. O comprimento do material também impacta positivamente no sistema, porém o custo do sistema aumento, conseqüentemente, sendo necessário critérios de projeto para avaliar o custo-benefício.

Figura 7 – EAHE conectado ao forro de PCM do ambiente para descarga térmica do material



Fonte: Rodrigues e Gillott (2013)

Rodrigues e Gillott (2013) propuseram um sistema de condicionamento de ar integrando EAHE com uma placa PCM. O ar já condicionado pelo EAHE passava para uma cavidade onde uma das superfícies era o PCM, estando voltada para o ambiente interno, assim retirando o calor acumulados das placas e exaurindo o ar para fora da cavidade, para o ambiente externo (Figura 7). A análise foi realizada através de um aparato experimental, na BASF House, localizada na Inglaterra, comparando um sistema de referência com o de PCM. O sistema sem o EAHE reduziu a flutuação de temperatura interna em 33%, e com EAHE pode chegar a 47%. Não ocorreu queda suficiente de temperatura, ainda se mantendo numa zona de desconforto, porém as temperaturas de pico foram reduzidas

em mais de 8°C, produzindo uma refrigeração de 8,81 W/m³. Os resultados foram satisfatórios, fazendo-se a necessidade de futuras análises, inserindo ventilação mecânica no aparato.

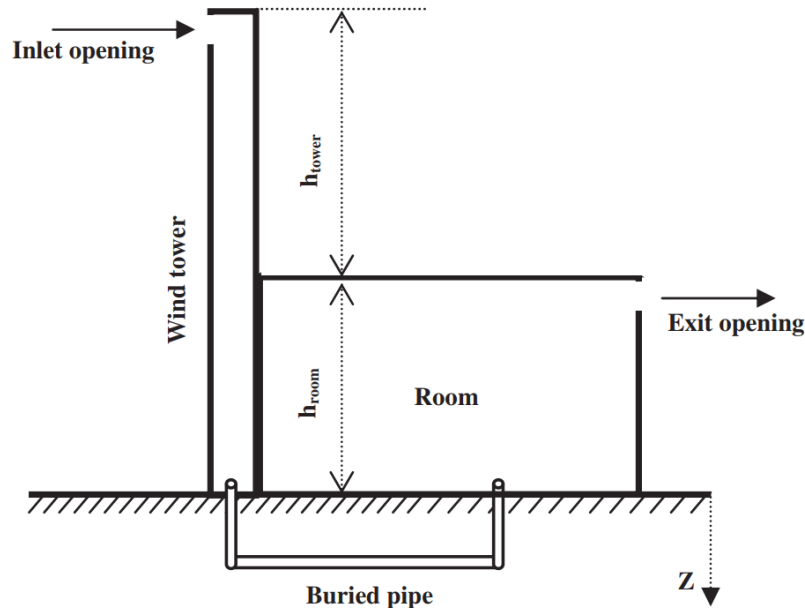
Resfriamento evaporativo

Bansal et al. (2012) avaliaram o desempenho de um EAHE conectado com um sistema de resfriamento evaporativo em climas quentes e secos. Para isso, desenvolveram um modelo computacional fluidodinâmico multifásico no software Fluent, com seus resultados validados experimentalmente num aparato localizado na cidade de Ajmer, Índia. O erro observado foi próximo a 4,5%, podendo o modelo ser considerado utilizável para uma avaliação energética anual. Como resultado, o sistema entregou o equivalente a 7609 MJ de capacidade de condicionamento. Além disso, observou-se que sem as estratégias o ambiente estava em conforto durante 25,6% do ano, e com o uso do sistema passivo esse valor aumentava para 34,16%. Segundo os autores, mesmo esse valor sendo não elevado, as temperaturas com o sistema ficaram próximas ao valor de conforto, assim, utilizando conforto adaptativo como referência, os números em conforto poderiam aumentar significativamente.

Torre de vento

Benhammou et al. (2015) desenvolveram um modelo matemático que simula o comportamento térmico de um EAHE conectado a uma torre de vento, como representa a Figura 8, arrefecendo uma edificação numa região de clima quente e seco, na Argélia. O modelo matemático é analítico em regime transiente, baseado em métodos iterativos, sendo validado por outros estudos feitos previamente, avaliando parâmetros geométrico do sistema, seu fluxo e temperatura de ar. Os resultados obtidos foram que a área de seção da torre mostra não ter efeito no desempenho do sistema, e sua altura uma pequena significância. Com o uso da torre de vento, a velocidade do ar dentro do EAHE é influenciada pela velocidade dos ventos externos, aumentando a eficiência do sistema quando a velocidade externa é maior.

Figura 8 – Torre de ventilação na entrada do EAHE para elevar o fluxo de vento do sistema



Fonte: Benhammou et al. (2015)

Ventilação natural

Zheng, Pan e Yoshida (2011) desenvolveram uma ferramenta que avalia a taxa de ventilação natural de um ambiente levando em conta a temperatura interna vertical, junto com o uso de um EAHE no ambiente, localizado no Japão. A ferramenta foi utilizada em conjunto de um modelo em CFD para integrar com mais precisão essas estratégias. Os resultados demonstram que quando existe ventilação natural em direção as aberturas, o EAHE não exerce influência no desempenho térmico da edificação, contribuindo com apenas 8% do fluxo de ventilação. O desempenho térmico do sistema é pouco melhorado com o EAHE, porém quando conectado com um sistema de ar-condicionado, o uso do EAHE pode economizar de 7 a 36% no consumo energético do HVAC.

Ascione, Bellia e Minichiello (2011) analisaram o comportamento de um EAHE junto com ventilação cruzada para edificações em diferentes regiões da Itália. Para isso, os autores desenvolveram modelos computacionais para simulação do comportamento térmico da edificação e do EAHE, avaliando o desempenho energético do sistema mudando diversas condições de projeto, como dimensionamento das tubulações, tipos do solo, velocidade do ar etc. Em regiões mais quentes, com o sistema em uso totalmente passivo, o sistema não pôde oferecer condições de conforto interno, melhorando para regiões mais frias. Com o uso de ventiladores, o sistema pode economizar em 44% a necessidade de transferência de energia térmica. Além disso, os materiais das tubulações não influenciaram no desempenho do EAHE, e o comprimento obteve um aumento de desempenho de 10m até 50m, após isso o ganho energético foi irrisório. O retorno de investimento do sistema poderá ser entre 5 e 9 anos.

Mais de uma solução integrada

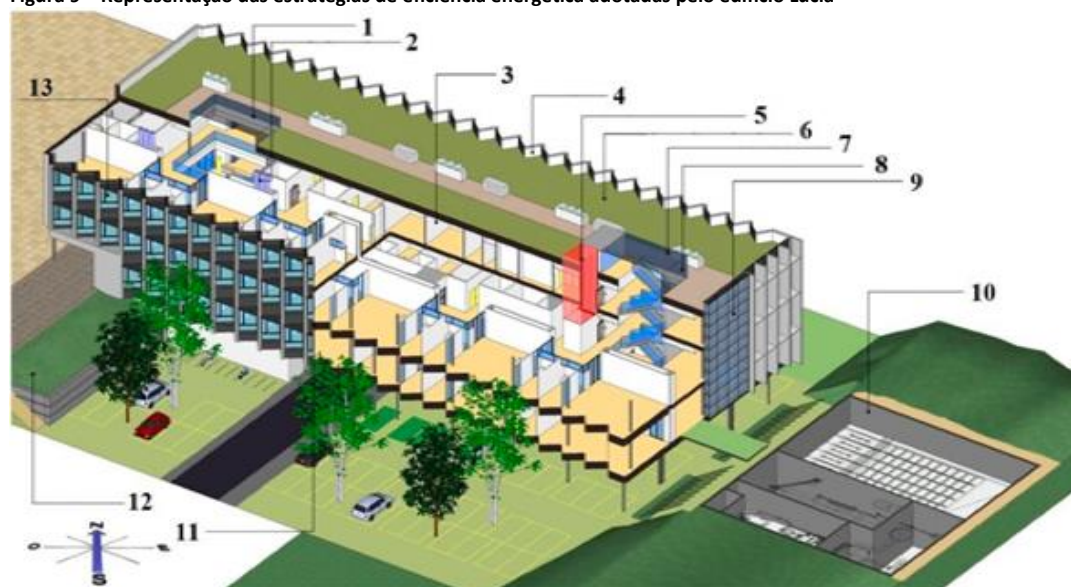
Alemu, Saman e Belusko (2011) desenvolveram um modelo que simula um sistema que utiliza diversas estratégias passivas para o condicionamento de ar de uma edificação. As estratégias adotadas foram EAHE, torre de vento, chaminé solar e ventilação natural. Para a avaliação, um modelo matemático foi desenvolvido no software Matlab, em regime transiente, podendo avaliar o comportamento térmico de múltiplos ambientes, além do fluxo de ar das estratégias integradas. Um aparato experimental validou os resultados, obtendo boa concordância entre valores experimentais e os obtidos no software TRNSYS, sendo utilizado as condições climáticas da cidade de Adelaide, Austrália. Seis configurações foram analisadas para a simulação, sendo uma delas como todas as estratégias em uso. Para um clima moderado, apenas com ventilação cruzada, o número de horas em desconforto térmico foi de 6 (seis), enquanto com todas as estratégias ativas o número foi de zero (0). Para clima quente, ventilação cruzada foi de 9 (nove), porém a solução que melhor se comportou foi o EAHE com chaminé solar, sem o uso de ventilação cruzada, resultando em 7 (sete) horas de desconforto. Assim, o sistema provou-se capaz de arrefecer o ambiente passivamente.

Estudos de caso

Bomberg et al. (2018) construíram um EAHE para arrefecer um laboratório na Universidade de Cracow, Polônia, sem um sistema localizado abaixo da edificação e outro ao lado. As temperaturas do sistema foram medidas através de sensores posicionados ao longo da tubulação. As medições mostraram que os dois sistemas se comportam de maneira similar, porém o sistema que está localizado abaixo da edificação teve um desempenho de condicionamento superior. Isso pode ser causado pela mudança de umidade do solo ou mesmo a transferência de calor da edificação para a tubulação. A utilização periódica do EAHE também contribui para seu desempenho, por dar tempo da temperatura do solo se regenerar.

Rey-Hernández et al. (2018) avaliaram uma edificação chamado LUCIA, que está localizado em um dos campi da universidade de Valladolid, Espanha (Figura 9). As estratégias adotadas foram energia solar fotovoltaica, biomassa, EAHE, todos conectados a um sistema de aquecimento combinado. A análise do desempenho energético desse edifício foi feita através do software Designbuilder, com o intuito de comparar o balanço energético de estratégias que utilizam energias renováveis com as que não utilizam. Discrepâncias entre os dados de simulação e monitoramento do caso analisado foram avaliadas. Assim, observou-se que a energia geotérmica contribuiu significativamente em sua parcela de energia primária renovável, sendo responsável por 33% da energia gerada.

Figura 9 – Representação das estratégias de eficiência energética adotadas pelo edifício Lucia



Impressão Artística do LUCIA ZEB 3D; 1. células fotovoltaicas; 2. dispositivos de luz natural; 3. controle de luminosidade; 4. telhas fotocatalíticas; 5. sistema de regeneração energética; 6. teto verde; 7. células fotovoltaicas; 8. átrio; 9. parede fotovoltaica; 10. CHP; 11. falta de ponte termal; 12. área de tubos geotérmicos; 13. janelas automatizadas

Fonte: Rey-Hernández et al. (2018)

Digiovanni, Jeng e Wan (2012) apresentaram o processo de projeto e construção de uma edificação, localizada no Canadá, que se utilizou de técnicas passivas de arrefecimento e produção de energias renováveis no próprio local. Alguns dos sistemas de condicionamento de ar foram pisos radiantes, ventilação natural, EAHE e o uso de efeito chaminé. As lições aprendidas foram que o uso de análise de custo de vida é necessário para a determinação de custo-benefício das soluções sustentáveis, a necessidade de tempo suficiente para planejamento e pesquisa previamente, e a comunicação constante com o cliente e a jurisdição local são importantes para definir riscos e áreas de responsabilidade do contrato. Além disso, a disponibilidade de pesquisas mais claras na aplicação de soluções sustentáveis seria um diferencial nesse tipo de projeto.

Hitchmough et al. (2011) descreveram como o uso do BIM (Building Information Modeling) e de simulações computacionais podem auxiliar no projeto de uma edificação, localizado na cidade de Manchester, Inglaterra, que incorpora soluções inovativas de condicionamento de ar de baixo consumo energético, como EAHE e fachadas duplas. As lições aprendidas nesse empreendimento foram que todo o processo deve ser iterativo e o modelo conceitual deve ser regularmente revisto. A modelagem das estratégias passivas de climatização deve ter um detalhamento maior

para melhor compreensão do comportamento térmico da edificação. E por fim o uso de BIM possui limitações na data da publicação do artigo em termos de análise energética, além das dificuldades de interoperabilidade com outras ferramentas de análises.

2.4 Considerações sobre a RSL

Os artigos selecionados possuíram diferentes metodologias e foram realizadas em diferentes localidades, demonstrando a variedade da pesquisa realizada. O quadro 1 resume os artigos selecionados. Assim, os resultados obtidos apresentados nesta revisão são apropriados para a melhor compreensão do assunto. Os artigos utilizaram 8 diferentes estratégias passivas integradas ao EAHE. A maior parte dos artigos analisaram a chaminé solar conectada ao sistema, com 4 artigos, seguida dos PCM e ventilação natural, com 2 artigos, e as outras estratégias com 1 artigo cada.

Tabela 1 – Resumo dos artigos revisados

Autores	Solução	Metodologia	Localização	Resultados
Serageldin, Abdelrahman e Ookawara (2018)	Chaminé solar	Experimental	Egito	Proveu ventilação suficiente para o conforto térmico do ambiente
Kaushal et al. (2015)	Chaminé solar	Analítico	Índia	Proveu ventilação suficiente para o conforto térmico do ambiente
Li et al. (2014)	Chaminé solar	Experimental	EUA	O ambiente permaneceu dentro da faixa de conforto térmico entre 21,3 e 25,1°C
Maerefat e Haghghi (2010)	Chaminé solar	Analítico	Irã	Proveu boas condições térmicas ao ambiente
Afrand et al. (2019)	Placa fotovoltaica	Analítico	Irã	Ganho anual de energia térmica foi de 3500 kwh
Badawiyeh, Ghaddar e Ghali (2017)	Parede trombe	Analítico + Estudo de caso	Líbano	Diferença de temperatura entre o ambiente e o ar de saída do EAHE é entre 1,3 e 7,2°C
Yang e Zhang (2015)	Massa térmica	Analítico + Experimental	China	Contribui para a diminuição do uso de ar-condicionado
Liu et al. (2019)	PCM	Analítico + Experimental	China	Diminui a amplitude da temperatura de saída em 30%
Rodrigues e Gillott (2013)	PCM	Experimental + Estudo de caso	UK	Temperaturas de pico foram reduzidas em mais de 8°C
Bansal et al. (2012)	Resfriamento evaporativo	Analítico + Experimental	Índia	Entregou o equivalente a 7609 MJ de refrigeração
Benhammou et al. (2015)	Torre de vento	Analítico	Argélia	Aumento da eficiência do sistema quando com ventilação na entrada
Zheng, Pan e Yoshida (2011)	Ventilação natural	Analítico	Japão	Pode economizar de 7 a 36% no consumo energético do HVAC
Ascione, Bellia e Minichiello (2011)	Ventilação natural	Analítico	Itália	Potencial de economia de 44% no consumo energético
Alemu, Saman e Belusko (2011)	Chaminé solar + torre de vento + ventilação natural	Analítico + Experimental	Austrália	Provou-se capaz de arrefecer o ambiente passivamente
Bomberg et al. (2018)	Diversos	Estudo de caso	Polônia	Responsável por 33% da energia gerada.
Rey-Hernández et al. (2018)	Diversos	Estudo de caso	Espanha	Necessidade de pesquisas na aplicação de estratégias passivas
Digiovanni, Jeng e Wan (2012)	Diversos	Estudo de caso	Canadá	BIM possui limitações em termos de análise energética
Hitchmough et al. (2011)	Diversos	Estudo de caso	UK	EAHE abaixo da edificação possui um desempenho superior

Fonte: O autor

O método de avaliação mais utilizado foi o analítico, com o desenvolvimento de modelos matemáticos para simular a solução. Outros utilizaram de aparatos experimentais para

validar os modelos propostos. Poucos artigos aplicaram os modelos desenvolvidos em um estudo de caso. Entretanto, artigos com aplicação de EAHE junto com outras estratégias passivas, em edificações construídas, foram encontrados.

A chaminé solar supriu principalmente a necessidade de ventilação do ambiente. As configurações físicas da chaminé possuem grande influência no desempenho dos sistemas, principalmente sua altura, inclinação e tamanho da lacuna. O sistema com a parede de trombe conseguiu gerar circulação de ar pelo EAHE sem necessidade de ventiladores, podendo diminuir a temperatura interna em mais de 7°C.

O uso de massa térmica pode contribuir com o desempenho do EAHE, por prolongar seu atraso térmico, fazendo com que a carga de resfriamento das tubulações impacte mais na temperatura interna. Porém, esse efeito deve ser utilizado com cautela, para não diminuir o conforto térmico no período noturno. O EAHE, com PCM tanto ao longo de sua tubulação, quanto como meio de descarga de calor do PCM, obteve baixas flutuações na temperatura de saída; porém, as temperaturas normalmente ficaram fora da zona de conforto.

Os números de horas em conforto térmico aumentaram com o uso de resfriamento evaporativo, com um nível aceitável de umidade interna. A torre de vento contribuiu para o aumento de pressão do sistema, principalmente quando os ventos do ambiente externas estavam em direção de sua entrada. O arrefecimento por EAHE em ambiente com abertura para prover ventilação natural é possível, diminuindo a necessidade de uso de um sistema de ar-condicionado.

Assim, as estratégias analisadas demonstraram que possuem potencialidade do condicionamento de ar interno de uma edificação. Os modelos matemáticos desenvolvidos mostraram boa concordância com os dados obtidos experimentalmente. Edificações avaliadas em estudos de caso demonstraram que o uso de EAHE junto com outras estratégias passivas e sustentáveis de climatização pode economizar considerável no consumo energético da edificação.

Algumas pontuações também foram feitas, como a necessidade de um aprofundamento dos modelos matemáticos para sua aplicação em projetos de edificações em escala real, o uso de análise de custo de vida para comparar as vantagens econômicas e custos ambientais de cada solução, sendo ativa ou passiva, melhorar a funcionalidade de ferramentas BIM para incorporar análises energéticas de estratégias passivas de climatização, ou mesmo facilitar a integração entre softwares para essa funcionalidade e desenvolver metodologias para uma maior clareza do impacto energético das estratégias ao longo da vida da edificação para deixar mais atrativo e seguro a implementação de tais elementos de climatização.

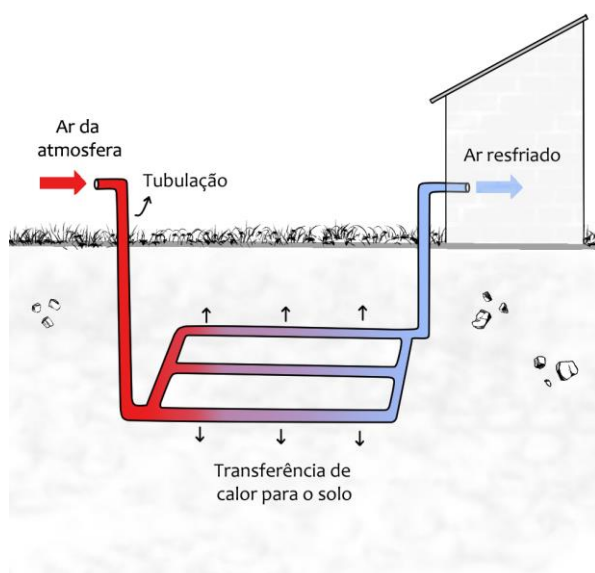
Para este projeto, será utilizada as estratégias de EAHE, chaminé solar, parede PCM e o uso de aberturas para ventilação natural, pois estas possuem alta aplicabilidade em projetos arquitetônicos e seu uso não necessita de auxílios mecânicos complexos ou pós-tratamento do ar, por suas trocas apenas serem por calor sensível e não latente. Além disso, a entrada e saída de ar do sistema possuem simplificada previsibilidade.

2.5 Estratégias passivas: seleção e caracterização

Trocador de calor solo-ar

Trocador de calor solo-ar (popularmente conhecido como “EAHE”, em inglês) é um sistema de tubulações enterradas no solo capaz de resfriar ou aquecer o fluido conduzido, dependendo da estação do ano. Para isso, o sistema utiliza a energia geotérmica como fonte de calor, transferindo energia do solo que a tubulação se encontra para o ar que está dentro do sistema. O solo é uma eficiente fonte de calor, pois possui temperaturas estáveis a partir de uma certa profundidade, sendo observado baixas oscilações a partir de 3 a 4 metros (SUPARWOKO, 2018). Devido à alta inércia térmica do solo, a sua variação de temperatura diária é baixa, mesmo com altas flutuações de temperaturas do ar ambiente e radiação solar. Assim, o uso de sistemas EAHEs tem se tornado popular para a climatização de ambientes, por utilizar uma fonte energética natural para seu funcionamento. A Figura 10 ilustra o sistema instalado.

Figura 10 – Representação esquemática de um trocador de calor solo-ar



Fonte: O autor

O conhecimento dessa solução vem desde tempos remotos, onde túneis de ar eram utilizados pela arquitetura iraniana para resfriar e aquecer edificações 3000 AC (GOSWAMI; ILESLAMLOU, 1990). Essa tecnologia estacionou nessas construções tradicionais, porém, nas últimas décadas, devido às reservas energéticas estarem se esgotando rapidamente, o interesse pelo uso de sistema EAHE vem retornando. Segundo Kaushal (2017), esse sistema ganhou popularidade no meio acadêmico a partir de 1990, porém seus modelos eram simplificados e seu uso em construções foi limitado por baixa performance ou desvantagens como altos custos iniciais. Entretanto, projetos modernos vêm utilizando cada vez mais esses sistemas, já que o potencial para seu uso é promissor, necessitando pesquisas para aumentar a confiabilidade de sua implementação.

Estudos demonstram que o uso de EAHEs é uma eficiente solução para a climatização de edificações, por terem a capacidade de resfriar durante o verão e aquecer no inverno. Além desses benefícios, segundo Ozgener (2011), outros pontos positivos são: o fluido utilizado no sistema é o ar, consome menos energia que sistemas de condicionamento de ar, seu design simples demanda menor custo de produção e manutenção e poluem menos por não utilizarem gases refrigerantes para seu funcionamento. Os pontos

negativos são: o custo de instalação é alto, a ocorrência de condensação dentro das tubulações, e o crescimento de micro-organismo pode ocorrer no sistema, porém esses últimos dois pontos podem ser controlados por parâmetros de projeto adequados. Porém, tais problemas podem ser superados com um melhor entendimento nas características construtivas e de projeto desse sistema.

- Classificação:

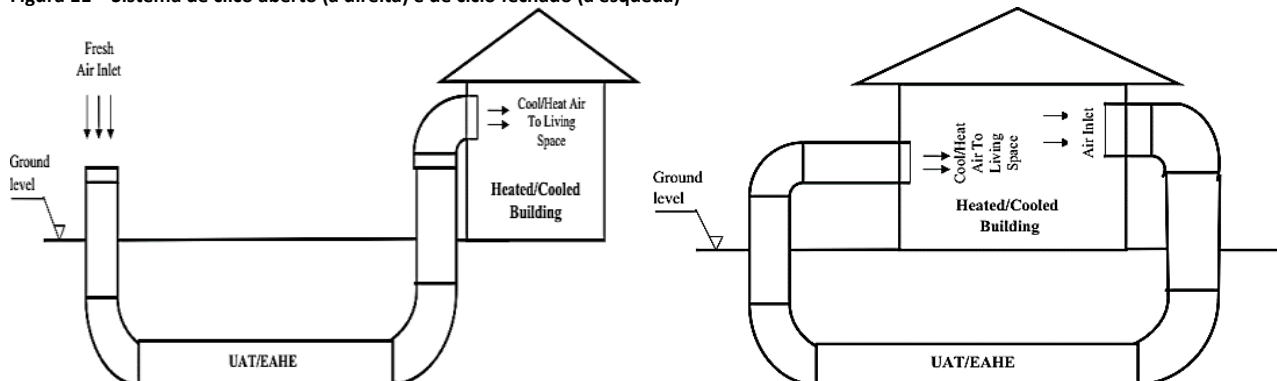
O sistema EAHE pode ser classificado em 3 tipos de configurações relacionados ao fluxo de massa dentro do sistema: ciclo aberto, ciclo fechado e sistema híbrido (BORDOLOI *et al.*, 2018). A Figura 11 ilustra os dois primeiros tipos de configurações.

Ciclo aberto: neste tipo de sistema o ar ambiente é aspirado por um tubo de admissão que está localizado fora do ambiente que será climatizado. O ar então percorre ao longo do tubo enterrado, sendo seu tubo de saída localizado dentro do ambiente climatizado, insuflando diretamente o ar aquecido ou resfriado; pré-condicionando para um outro aparelho que fará o tratamento final antes de climatizar diretamente o ambiente; ou mesmo não sendo insuflado para dentro do local, circundando o ambiente entre suas superfícies opacas, como paredes, pisos e coberturas, climatizando o ambiente de forma indireta. Após o condicionamento do local, o ar é transportado para fora do ambiente, através de exaustores, ou mesmo naturalmente por aberturas, como frestas ou janelas.

Ciclo fechado: para este sistema, o ar continua recebendo ou cedendo calor ao solo, porém o ar aspirado no tubo de entrada é o mesmo ar que é expirado pelo tubo de saída. O meio de troca do ambiente que está sendo climatizado é um aparelho que utiliza esse ar para trocar calor, ou mesmo as superfícies opacas que envolvem o ambiente. Essa solução é mais eficiente que o ciclo aberto e reduz problemas envolvidos com umidade do ar, porém não renova o ar, o que impossibilita seu uso para climatizar diretamente o ar do ambiente em demanda. Porém seu uso para condicionamento indireto é devidamente aplicável.

Sistema híbrido: com esta configuração, o sistema pode ser de ciclo aberto ou fechado, porém está conectada com outras estratégias de climatização que não necessitam do EAHE para pré-condicionamento do ar, mas sim para auxiliar a circulação do fluido no sistema ou tratamento do ar em conjunto com o EAHE. Exemplos de estratégias auxiliares são chaminés solares e torres de vento, que contribuem com o transporte de ar no sistema, ou climatizadores evaporativos que contribuem com a umidade do sistema e sua temperatura.

Figura 11 – Sistema de ciclo aberto (à direita) e de ciclo fechado (à esquerda)



Nota: (LE; NGUYEN, 2019)

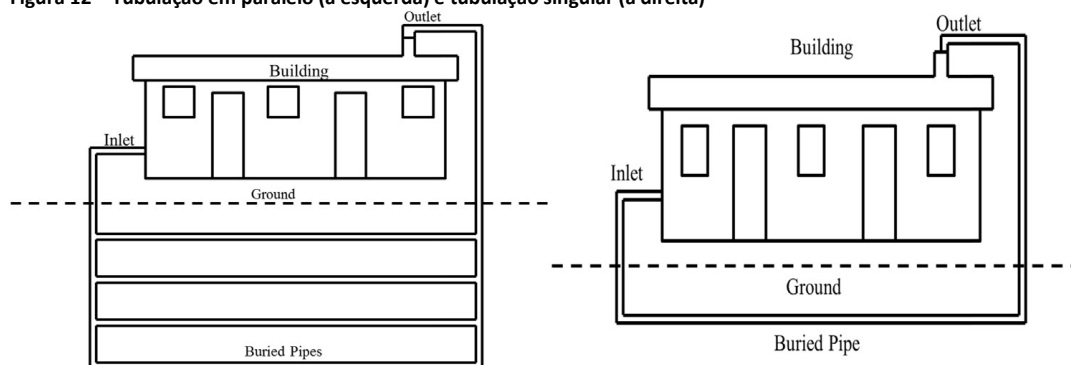
Arranjo

Para a disposição da tubulação, o sistema pode adotar basicamente duas configurações: tubos em série ou tubos em paralelo (Figura 12). O sistema em paralelo ocupa menos espaço em sua instalação, e o diâmetro de suas tubulações são menores que o do sistema em série para seu desempenho ótimo (GOSWAMI; BISELI, 1993). Em todo caso, o espaçamento entre as tubulações deve ser próximo a 1 metro (ZIMMERMANN; REMUND, 2001). Dubey, Bhagoria e Lanjewar (2013) avaliaram que a configuração em paralelo também resulta em menores velocidade do ar dentro das tubulações, o que resulta em maiores quedas de temperatura e um maior COP do sistema. Assim, o uso da configuração em paralelo tem sido usado para otimizar o projeto de sistema EAHE por possuir um melhor desempenho a um menor custo (EREC, 2002).

Normalmente, é utilizado seções retas circulares de tubulação para o sistema EAHE, porém os tubos podem tomar diversas outras configurações, como espiral, helicoidal, retangulares, ou mesmo formas complexas. Mathur et al. (2017) propuseram um sistema que utiliza tubulações em espiral e verificou que esse sistema tinha um COP de 6,24 enquanto o horizontal possuía 5,94, além de ocupar menos espaço, chegando ao mesmo resultado de Benrachi et al. (2018). Porém, em sua escolha, as tubulações retilíneas são preferíveis por facilidade de instalação e custo, além de sua produção (ABHIRAG, 2019).

As tubulações também podem ser posicionadas horizontal ou verticalmente, onde tubos verticais requerem menor área de instalação quando comparado ao horizontal, além de possuir um uso mais eficiente da energia geotérmica do solo e facilidade na drenagem de água condensada dentro dos tubos (LIU, Qinggong; DU; FAN, 2018). Porém, o custo de instalação de tubulações horizontais é consideravelmente menor do que o vertical (BORDOLOI et al., 2018). Com isso, o desempenho não é o único fator que se coloca no processo de escolha, tendo o custo e facilidade de instalação um alto peso.

Figura 12 – Tubulação em paralelo (à esquerda) e tubulação singular (à direita)



Fonte: (BORDOLOI et al., 2018)

- Solo:

Um dos parâmetros mais importantes para se conhecer no sistema são as características físicas e geológicas do solo. É de interesse o conhecimento de suas propriedades físicas, como condutividade térmica, densidade, difusividade, assim como umidade, profundidade de sua base rochosa etc. Essas informações são necessárias para selecionar o tipo de sistema EAHE, além de auxiliar na avaliação de sua implementação (BISONIYA, T.S.; KUMAR; BAREDAR, 2013). Além disso, é importante também conhecer a interação do solo com o ambiente externo, através de sua cobertura vegetal e condições ambientais do ar (LABS, 1989). Com um estudo detalhado do solo, a determinação das características de projeto para a tubulação conserva-se mais precisa.

As condições físicas do solo, por influenciarem significativamente na efetividade do sistema, precisam ser determinadas. ASCIONE, BELLIA e MINICHELLO (2011) montaram um sistema de 50 metros de comprimento a uma profundidade de 3 metro, e sua melhor performance estaria associada a solos molhados ou úmidos. Assim, quando se é instalado em solo úmido ao invés de solo seco, o próprio comprimento da tubulação pode ser reduzido para atingir os mesmos resultados de desempenho (AGRAWAL *et al.*, 2019). Reforçando esses resultados, Morshed *et al.* (2018) demonstraram que o COP do sistema instalado em um solo úmido (6,41) é maior quando comparado ao mesmo sistema em um solo seco (5,07). Já Rodrigues *et al.* (2018) demonstrou que não só a umidade do solo influencia, mas também o tipo de solo, sendo que os mais argilosos contribuíram positivamente para o desempenho do sistema.

A cobertura do solo também atua na temperatura de saída do sistema, por alterar a quantidade de troca de calor entre o solo e o ambiente. Segundo Kaushal (2017), o calor armazenado pelo solo é maior quando sua superfície está coberta por vegetação, beneficiando o sistema quando aplicado para o aquecimento, porém prejudicando a performance para o resfriamento. Mogharreb *et al.* (2014) chegaram a mesma conclusão, analisando o efeito da cobertura de vegetação para um sistema dentro de uma estufa. Sua compactação também contribui para o desempenho do sistema, influenciado pelo tipo de solo onde o sistema é instalado, apresentando variadas taxas de compressibilidade por diferentes regiões. Assim, um solo úmido, argiloso, e compactado apresenta uma alta contribuição para as trocas de calor solo-ar (ELMINSHAWY *et al.*, 2017).

- Tubulação:

A performance do EAHE também depende das dimensões dos tubos e as características físicas de seus materiais. Valores de diâmetro, espessura, comprimento, rugosidade, material da tubulação, profundidade em que está, além de outros valores de entrada, precisam ser conhecidos para avaliar a efetividade de seu desempenho (PERETTI *et al.*, 2013). Materiais com alta condutividade térmica são desejados para esses sistemas, como PVC, por exemplo (SOBTI; SINGH, 2015). Além das características construtivas, também existe o efeito da taxa de fluxo de massa, que envolve a velocidade quantidade de massa do fluido circulante, que no caso é o ar. Todas essas características são importantes para a determinação do desempenho térmico do sistema EAHE.

Segundo Soni, Pandey e Bartaria (2015), vários autores chegaram ao resultado que o material da tubulação não influencia consideravelmente na performance do sistema enterrado, tanto para resfriamento no verão, quanto aquecimento no inverno. Com isso, fatores que influenciam na decisão de escolha do material estão sobretudo na etapa de compra e instalação: tubos plásticos são mais baratos, porém no processo de aterro estão mais vulneráveis a danos mecânicos do que tubos metálicos, que em seu caso teria uma maior resistência a avarias, porém com um aumento no custo de projeto entre 25% e 30%. Assim, o custo e a durabilidade do material seriam decisivos para a escolha do material do sistema, sendo um fator secundário sua capacidade antimicrobiana.

Com o material da tubulação em mãos, o projeto prossegue para a configuração de parâmetros da tubulação, sendo seu ajuste e otimização essencial para a eficiência do sistema. Alguns parâmetros construtivos sempre contribuem para a efetividade do EAHE quando aumentado seus valores, como o comprimento da tubulação e sua profundidade, porém seu ajuste ainda é necessário para a viabilidade de custo do projeto ou limitações de execução. O comprimento da tubulação pode ser reduzido com a utilização de múltiplas tubulações conectadas em paralelo (GOSWAMI; BISELI, 1993)

ou mesmo em sua forma (p.ex. espiral) ou direção (p.ex. vertical). Em relação a profundidade, as tubulações devem estar enterradas ao menos 1,5 metros abaixo da superfície do solo, mas a temperatura do solo em profundidades acima de 3,5 metros não se altera significativamente (EREC, 2002).

Outros parâmetros de geometria da tubulação são mais suscetíveis a variação de valores quando submetidos a diferentes demandas de projeto. O diâmetro das tubulações é o que mais depende das outras configurações, podendo variar seu diâmetro entre 150 e 450 milímetros para um projeto otimizado (IEA, 1999). Serageldin, Abdelrahman e Ookawara (2018), em seus estudos sobre um EAHE conectado a uma chaminé solar, avaliaram certos parâmetros, como profundidade, altura da entrada de ar, diâmetro da tubulação etc. Por uma técnica estatística conhecido como análise de sensibilidade, percebeu-se que o diâmetro da tubulação é o parâmetro que mais influencia no desempenho do sistema, sendo um importante fator para diminuição da carga térmica e no aumento do fluxo de massa no sistema. Entretanto, Goswami e Biseli (1993) pontuam que menores diâmetros de tubulação geravam uma maior queda de temperatura, porém aumentando o consumo energético pelo ventilador instalado, por isso a necessidade de otimização do sistema, visando a demanda e desempenho. A Figura 13 mostra o uso de tubulações com diferentes diâmetros em um mesmo sistema.

Figura 13 – Tubulação enrugada com arranjo em paralelo



Fonte: (BORDOLOI *et al.*, 2018)

- Desempenho:

O sistema EAHE é usado popularmente em países de clima mais frio, onde se pode utilizar para aquecimento e resfriamento, no verão ou no inverno, porém seu uso em regiões de clima quente tem ganhado atenção, pelo seu potencial de redução no consumo energético por sistemas de ar-condicionado (KAUSHAL, 2017). Assim, diversos estudos têm se dedicado a avaliar o desempenho deste sistema em regiões que possuem condições de altas temperaturas do ar ambiente, também abrangendo países em desenvolvimento, tendo como resultado ser um sistema aplicável em termos de desempenho e custo (BORDOLOI *et al.*, 2018).

Um sistema de túnel solo-ar foi construído em Gurgaon, Índia, para ventilar os quartos de um dormitório do campus RETREAT. Foram dispostos quatro túneis de 70 metros de comprimento e 0,7 metros de diâmetro, enterrados a uma profundidade de 4 metros, além dos quartos estarem conectados a uma chaminé solar para facilitar a circulação de ar. A temperatura ambiente foi reduzida de 45°C para 30°C dentro dos quartos, sem o uso de condicionadores de ar. O excesso de umidade nas temporadas de monção

resultava numa queda de eficiência do sistema, necessitando o uso de estratégias ativas de arrefecimento (MAJUMDAR, 2001).

Um sistema similar foi construído na Universidade de NIIT, Neemrana, Índia. O EAHE conseguiu manter uma temperatura de 28°C com o auxílio de um condicionador de ar. A redução do custo energético foi cerca de 60 a 70%, enquanto o custo de capital do sistema foi próximo ao do sistema de ar-condicionado (KANTH; CHAKRABORTY, 2015).

Bisoniya, Kumar e Baredar (2015) investigaram o comportamento energético de um sistema EAHE para uma região de clima quente e seco no hemisfério norte. As quedas máximas de temperatura foram de 11,3°C e 12,9°C para diferentes velocidades de fluxo. Com uma velocidade de fluxo de ar próximo a 5 m/s, o total de energia gerada ao longo do ano pelo sistema foi de 1290,53 kWh, e o retorno financeiro pelo sistema foi de 1,29 anos, pela economia de custo energético gerada quando comparada com um arrefecimento apenas por ar-condicionado.

Um sistema EAHE de tubulação horizontal foi desenvolvido para arrefecer uma estufa na Tailândia, em seu clima tropical. O desempenho deste sistema foi monitorado para as estações de verão, inverno e o período de monção, que possui altas valores de umidade. As tubulações possuíam 8 centímetros de diâmetro com um comprimento de 38,5 metros, enterrados a 1 metro de profundidade. Os valores de COP encontrados 3,56, 2,04 e 0,77 para as respectivas estações, demonstrando que o desempenho é maior para o resfriamento do que o aquecimento (MONGKON *et al.*, 2013). Esta conclusão também foi confirmada nos estudos de Abbaspour-Fard, Gholami e Khojastehpour (2011) e Mogharreb *et al.* (2014), incentivando seu uso para países de clima quente.

No Brasil, na cidade de Viçosa, Vaz *et al.*, (2011) avaliaram o consumo energético de um sistema EAHE através de uma análise numérica e experimental. Em uma profundidade maior que 2 metros, as diferenças de temperatura para aquecimento e resfriamento quando utilizado o sistema era mais de 8°C e 4°C respectivamente, demonstrando uma diferença de 15% em seu modelo numérico proposto. Vaz *et al.* (2014) também investigaram o comportamento térmico transiente do solo, assim como as suas propriedades térmicas, em uma construção chamada “Casa Ventura”.

Chaminé Solar

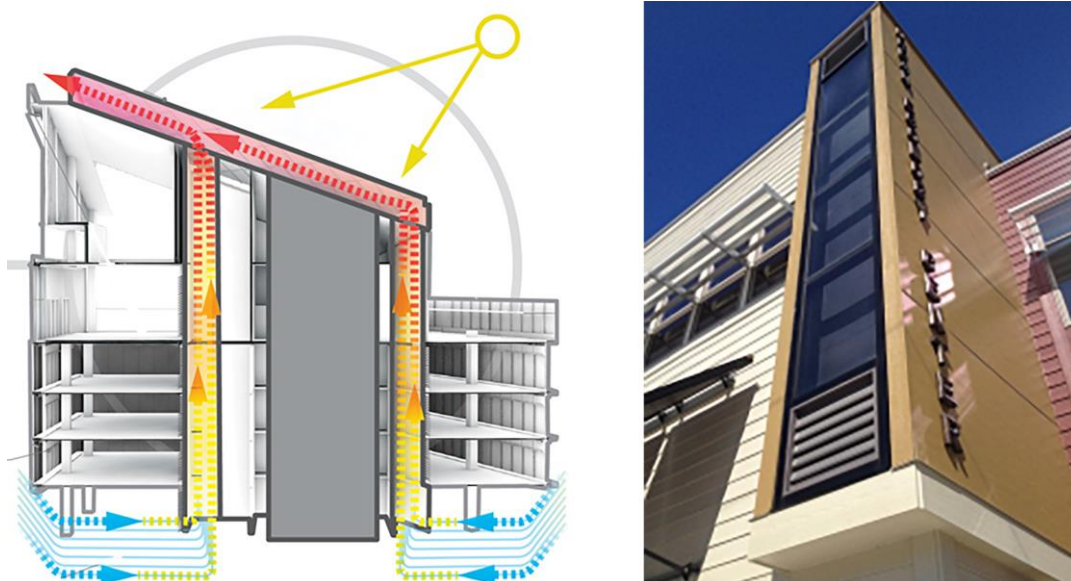
Chaminé solar é basicamente um canal térmico de seção retangular, existindo um fluxo de ar interno forçado devido a um gradiente de pressão gerado pela diferença de densidade do ar entre a entrada e a saída deste canal (PACHECO; ORDÓÑEZ; MARTÍNEZ, 2012). Essa diferença de densidade, associada a diferença de temperatura, é ampliada pela coleta de radiação solar incidente direta em uma das faces do canal, normalmente sendo um coletor de material opaco (p. ex. alumínio) para a absorção da radiação, oposta a face da cobertura do canal, de material transparente (p. ex. vidro).

Isso cria um “efeito estufa” dentro da cavidade, aquecendo ambas as faces e transferindo calor por convecção para o ar em circulação, em um ciclo contínuo (MONGHASEMI; VADIEE, 2018). Normalmente, o ar de entrada do sistema é o ar provido de um ambiente que demanda climatização, e o ar de saída é lançado para um ambiente externo (p. ex. atmosfera). Assim, a chaminé é utilizada para potencializar a ventilação do ambiente, aumentando as diferenças de pressão entre suas aberturas e, conseqüentemente, a renovação de ar interno. A Figura 14 representa alguns tipos de chaminés solares.

Os primeiros indícios de seu uso retornam a milênios atrás, sendo aplicados por séculos pela arquitetura persa, no Oriente Médio, e pelos romanos na Europa, sendo

considerada uma das estratégias de ventilação passiva mais antigas (LAL; KAUSHIK; BHARGAV, 2013). Devido ao desenvolvimento e popularização da ventilação mecânica, principalmente após a metade do século 20, a utilização de estratégias passivas de ventilação caiu em desuso e desinteresse, possuindo poucas pesquisas relacionadas a seu desempenho e desenvolvimento antes dos anos 80. Porém, nos últimos anos, após a necessidade de sistemas mais energeticamente eficientes, o volume de produção científica relacionada ao uso de chaminés solares tem aumentado expressivamente. Semelhantemente, de forma mais recente na literatura, tem-se aumentado o desenvolvimento de sistemas passivos integrados a chaminés solares (p. ex. EAHE + chaminé solar), como estratégias inovadoras de climatização passiva (MONGHASEMI; VADIEE, 2018).

Figura 14 – Representação de uma chaminé solar



Fonte: (CENTER, 2016)

O desenvolvimento de estudos sobre chaminé solar possui o principal intuito de entender o desempenho do dispositivo quando variado seus parâmetros de projeto. Shi et al., (2018), em sua revisão de literatura, dividiram esses parâmetros em quatro grupos: configurações (altura, lacuna da cavidade, área de seção de entrada e saída e relação entre altura e lacuna), condições de instalação (ângulo de inclinação, aberturas do ambiente e coletor solar), materiais (tipo de vidros, material do absorvedor e isolamento térmico) e ambiente (radiação solar, ventilação externa e outras condições climáticas).

Outros detalhes de projeto da chaminé também necessitam de pontuação, como as decisões de modelagem computacional do sistema e de seu comportamento da chaminé quando integrada a outras estratégias de climatização. A Figura 15 mostra um esquema representativo para modelagem matemática do sistema. Porém o principal foco das informações a seguir será na obtenção de valores e tendências de parâmetros mais efetivos para o desempenho térmico do sistema.

- Configurações geométricas:

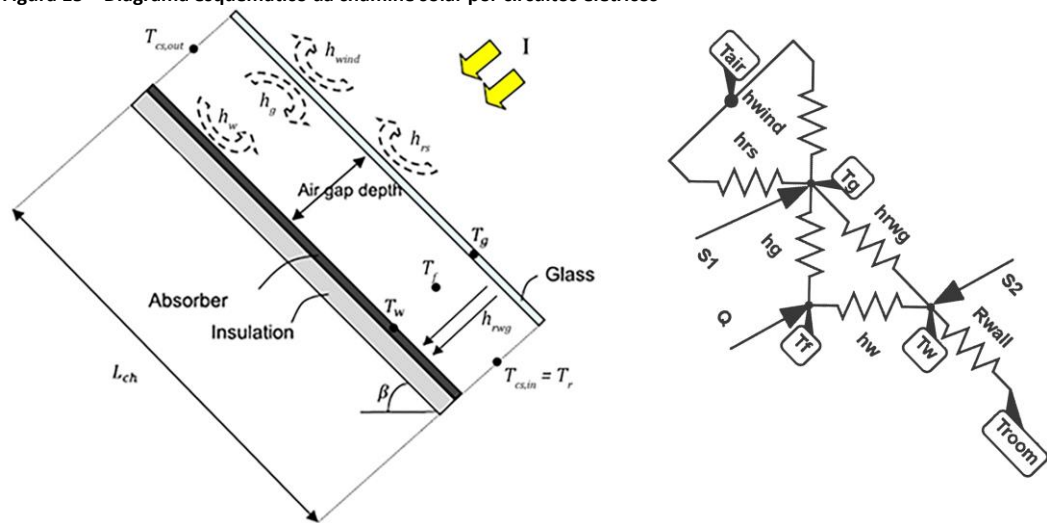
As configurações geométricas da chaminé solar devem ser ajustadas para atender as demandas de projeto e suas limitações construtivas, como espaço e custo. Para isso, é fundamental conhecer a influência de cada parâmetro de sua geometria. Afonso e Oliveira demonstraram que a largura da chaminé possui uma influência maior na taxa de

ventilação que a sua altura, também maior do que, segundo Bassiouny e Koura (2008), a área de entrada. Porém, quanto maior a largura, menor a temperatura de saída do sistema, o que significa uma menor diferença de pressão (TAN; WONG, 2013), e dificuldades na disponibilidade e instalação de vidros, na construção do sistema. Tal problema pode ser resolvido utilizando mais de uma chaminé solar conectada ao ambiente, suprimindo a demanda e mantendo a sua largura adequada (MAEREFAT; HAGHIGHI, 2010).

Em relação à altura da chaminé solar, Shi et al., (2018) concluíram que quanto maior a altura melhor são os resultados de seu desempenho de ventilação, devido ao aumento da diferença de pressão entre entrada e saída da chaminé. É estimado que quando se dobra a altura do dispositivo, o valor de fluxo de ar também é dobrado (SPENCER, 2001). Como o desempenho do sistema é diretamente proporcional à sua altura, Wei, Qirong e Jincui (2011) sugerem que se utilize o maior comprimento possível, dentro das limitações construtivas. Gonzales e Pimenta (2018) modelaram uma chaminé solar (Figura 16) e avaliaram que a altura da chaminé é importante para vencer a perda de carga gerada por outras estratégias conectadas ao ambiente

A eficiência térmica também é beneficiada com a altura, mantendo um crescimento similar de seu valor independente do índice de radiação solar, como mostraram Somsila, Teeboonma e Seehanam (2010), em seus estudos, onde a eficiência do sistema aumentou em 5% quando comparado chaminés de 1 e 2 metros de altura, tanto para 800 W/m² quanto para 400 W/m². Tal crescimento em desempenho é potencializado pela relação entre altura e diâmetro hidráulico da cavidade, onde Tan e Wong, (2013) sugerem um valor acima de 15:1.

Figura 15 – Diagrama esquemático da chaminé solar por circuitos elétricos



Fonte: (GONZALES e PIMENTA, 2017)

A lacuna da cavidade, que é a distância entre o material transparente e o opaco, e onde ocorre o fluxo de ar, também atua significativamente no desempenho do sistema. Autores demonstraram que quanto maior a cavidade, maior a taxa de fluxo de ar do sistema, tanto em modelos experimentais, quanto em modelo analíticos e computacionais (BASSIOUNY; KOURA, 2008; KHANAL; LEI, 2012; SHI, L. et al., 2016). Porém, o aumento demasiado da lacuna pode gerar um efeito inverso na contribuição no aumento do fluxo de ar, decrescendo a partir de um alto valor de lacuna (LEE, K.H.; STRAND, 2009).

Outro efeito indesejado é a possibilidade de fluxo reverso quando usada uma grande lacuna da cavidade, pois nesta situação a transferência de calor convectiva se limita ao ar próximo às faces da chaminé, com o ar no centro da cavidade estagnando-se por não receber calor desejado. Assim, é de interesse encontrar um valor otimizado entre o tamanho da lacuna e o fluxo de ar, evitando seu refluxo. Shi et al., (2018) comentam que diversos estudos sugeriram uma lacuna entre 0,2 metros e 0,3 metros para assegurar um máximo desempenho, porém o mesmo autor indica que outras pesquisas indicam que o valor ótimo de lacuna pode também depender de outros fatores além de seu tamanho, podendo variar até 0,6 metros.

- Configurações construtivas:

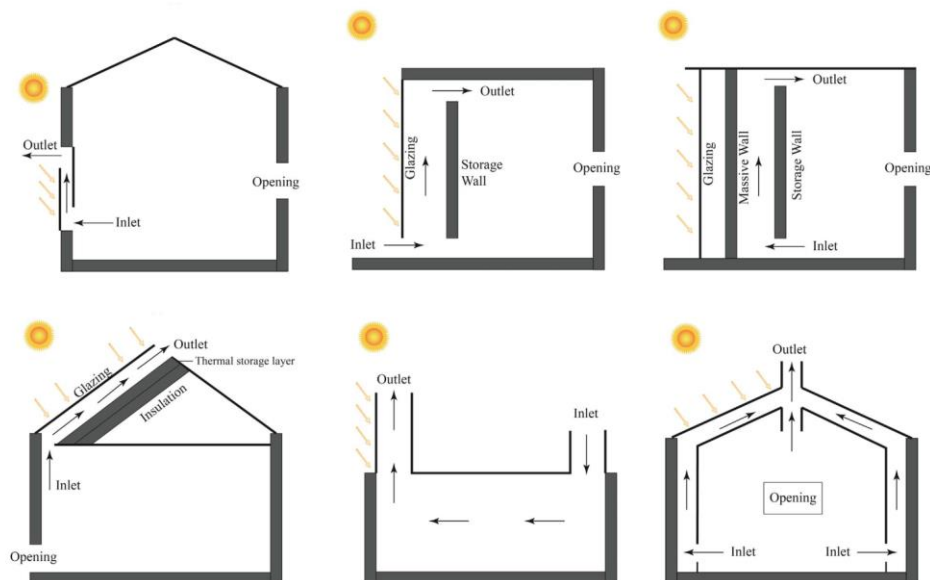
A chaminé solar pode ser vertical ou inclinada, dependendo onde será instalada. As chaminés solares verticais, conhecidas como “paredes trombe”, normalmente são instaladas junto às fachadas laterais da edificação, enquanto as inclinadas são instaladas na cobertura, dependendo de sua inclinação. Segundo Shi et al., (2018), diversos estudos encontram o valor otimizado de angulação na casa dos 45°, atribuindo esse resultado ao balanço entre tal valor gerar um maior gradiente de pressão dentro da cavidade e diminuir o coeficiente convectivo de transferência de calor entre faces e ar circulante.

Entretanto, outros estudos concluem que a inclinação da chaminé deve ser um parcialmente acima da inclinação que geraria uma máxima radiação solar diária total (SAKONIDOU *et al.*, 2008; SANTAMOURIS *et al.*, 2017). Outro fator importante é a latitude que se encontra o sistema, para se determinar o ângulo otimizado, onde Mathur et al. (2006) e Shi et al. (2016) encontraram o melhor desempenho entre os ângulos de 45° e 60°, com o deslocamento entre esses valores dependendo da latitude.

O coletor solar pode ter diversas configurações além de uma chaminé de seção retangular singular (Figura 16). Mathur et al., (2006) investigaram o desempenho de quatro chaminés solares com diferentes formas de seção, a qual de seção cilíndrica, com uma inclinação de 45°, apresentou uma boa viabilidade em sua integração com a fachada da edificação, aumentando o fluxo de ar interno em 15,94% (podendo chegar a 36,85% quando utilizado com cobertura transparente), comparado ao uso apenas de aberturas nas paredes verticais.

Também foram investigadas chaminés solares com passagens duplas, sobreposta uma a outra, onde (Zhai, Dai e Wang (2005) desenvolveram um modelo numérico para sua simulação, resultando numa eficiência superior instantânea de 10%, em média, em relação a um sistema de única passagem, tendo maiores fluxo de massa do ar e diferença de temperatura entre entrada e saída da chaminé. Além disso, as placas absorvedoras não precisam ser necessariamente lisas, podendo ter ranhuras em v ou bifurcadas, as quais El-Sawi et al. (2005) avaliaram terem melhor performance em certas taxas de escoamento. Percebe-se, no entanto, como fator mais significativo, o tamanho do coletor solar e sua relação diretamente proporcional a média de velocidade de fluxo e massa, além de seu desempenho (AL-KAYIEM; K.V.; GILANI, 2014)

Figura 16 – Exemplos de configuração para uma chaminé solar.



Fonte: (SHI, Long *et al.*, 2018)

- **Materiais Construtivos:**

Outra importante característica da chaminé solar são seus materiais construtivos. A parede absorptiva é uma peça essencial para o sistema, já que essa irá absorver a radiação solar. Seu material construtivo deve ser selecionado focando em maximizar a energia solar obtida, contribuindo para o aumento da temperatura da parede e sua manutenção pela maior duração possível. As propriedades físicas envolvidas são a sua emissividade, absorptância e capacitância térmica. Primeiramente, segundo Lee e Strand (2009), a taxa de fluxo de ar pode ser elevada em 57% quando a absorptância é alterada de 0,25 para 1, devido ao aumento de temperatura gerado por essa alteração; assim, quanto maior o valor, melhor o desempenho do sistema.

Contribuindo com esse resultado, Pillai e Agarwal (1981) constataram que sua relação com a eficiência do coletor é linear. Adequado a isso, a absorptância é trabalhada principalmente pela cor do material, com paredes absorptivas da cor preta apresentando os melhores resultados com a diferença de temperatura e desempenho do sistema (LEE, D.-S. *et al.*, 2015). Segundo, a emissividade, que está relacionada a emissão de energia radiante, também contribui para a eficiência do sistema, sendo que sua taxa de fluxo pode aumentar em 59% quando os valores de emissividade sobem de 0 para 0,9, em um sistema inclinado com um fluxo de calor de 100 W/m^2 (KHANAL; LEI, 2011).

O polimento influencia significativamente o valor da emissividade e aumenta a taxa entre fluxo de calor total e por radiação, podendo impactar diretamente na relação entre altura e largura da chaminé (NOUANÉGUÉ; BILGEN, 2009). Entretanto, Leon e Kumar (2007) concluíram que a absorptância tem uma relação de maior protagonismo com o desempenho do sistema do que a emissividade.

Os outros dois materiais construtivos que são de grande importância para a chaminé solar são a cobertura transparente e o isolamento térmico. Para a cobertura, normalmente é empregado vidro simples incolor, porém sendo viável o uso de vidros duplos ou triplos quando o objetivo é o aquecimento do ambiente em climas frio, até mesmo aumentando a performance do sistema nessas condições (HARRIS; HELWIG, 2007). Para a superfície transparente, transmitância, reflectância e absorptância são os parâmetros físicos que são de interesse para o sistema, porém a transmitância é o

parâmetro que mais influencia em sua performance, naturalmente, pois é desejada a entrada, o máximo possível, de radiação solar na cavidade da chaminé.

E o último material citado é o isolamento térmico, material que se localiza entre a parede absorviva e o ambiente interno. Gan (1998) constatou que 40% do ganho de calor pela parede absorviva seria transmitida para o ambiente interno quando não se utiliza isolamento térmico, algo indesejável quando o objetivo é o resfriamento. Assim, além de diminuir a condução de calor para o ambiente interno, o isolamento térmico também contribui diretamente com o gradiente de temperatura e fluxo de ar do sistema (HARRIS; HELWIG, 2007). Para sua espessura, Afonso e Oliveira (2000), através de uma simulação numérica, sugeriram que a espessura de 5cm é suficiente para obter sua eficácia otimizada, já que acima de 10cm não foi evidenciada nenhuma melhora significativa.

Uma outra importante característica é que não se obteve nenhum resultado expressivo quando se é alterado o valor de condutividade térmica na soma de parede absorviva e isolamento térmico, porém seu uso pode ser proveitoso pelo atraso térmico gerado, podendo ampliar seu tempo de rendimento (YANG, M. *et al.*, 2012).

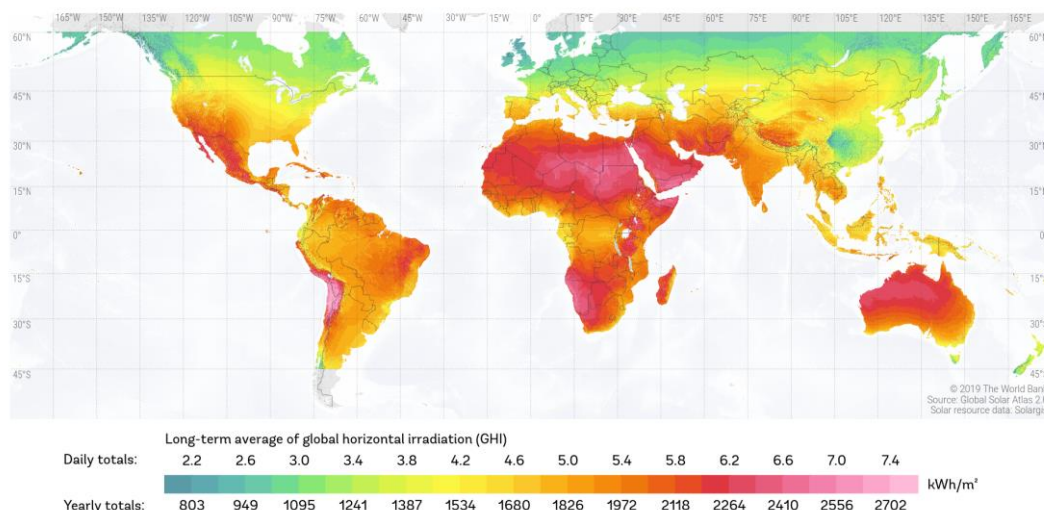
- Condições ambientais:

A chaminé solar necessita de condições climáticas favoráveis para o seu funcionamento satisfatório. Uma dessas condições é a que possibilita o sistema estar em operação: a radiação solar. Sem a radiação solar, a chaminé dependeria de aquecedores em sua placa, o que não é uma opção quando se deseja um sistema totalmente passivo. Somsila, Teeboonma e Seehanam (2010), em suas simulações numéricas, obtiveram um incremento da taxa de fluxo de ar e da eficiência de ventilação quando o sistema está exposto a altos valores de radiação solar. Porém, mesmo a baixas taxas de radiação, pode-se obter um fluxo mássico suficiente, ainda que o fluido seja um ar com alta umidade relativa (ABOULNAGA; ABDRABOH, 2000).

Tal resultado também é alcançado em residências de pequeno porte expostas a baixas taxas de radiação solar, quando se é aumentado a área de parede absorviva ou utilizado duas partições de chaminé (DRORI; DUBOVSKY; ZISKIND, 2005), assim como para um prédio de 5 andares, demonstrado por Priyadarsini, Cheong e Wong (2004). Em relação ao acréscimo na taxa de radiação solar que o sistema recebe, Manca *et al.* (2014) observaram o acréscimo de 30% no volume mássico que sai do sistema (e velocidade do ar) quando é aumentado a radiação solar de 300 para 600 W/m², além de aumentar em 10% na temperatura máxima do ar de saída. O mesmo resultado foi evidenciado por Chen *et al.* (2003), com um aumento de 38% na taxa de ventilação, utilizando um aquecedor no lugar da radiação solar, quando é aumentado seu valor de 200 W/m² para 600 W/m².

Porém, mesmos com resultados de crescimento na quantidade de fluxo de ar, velocidade ou temperatura, um maior valor de radiação não necessariamente significa um aumento na eficiência do sistema (SHI, Long *et al.*, 2018). Mas, para qualquer caso, um local onde se tem radiação solar abundante durante o dia contribui para um sistema de menor porte, mas com capacidade suficiente para as necessidades da construção em demanda. A Figura 17 ilustra as taxas de radiação para diferentes localidades no mundo.

Figura 17 – Média de longo prazo para a radiação global horizontal.



Fonte: (ATLAS, 2019)

A ventilação externa também influencia o comportamento físico do coletor solar. Segundo estudos, um valor de ventilação maior do que 2 m/s pode aumentar a velocidade do ar que passa pela cavidade interna da chaminé, sendo que, para sistemas expostos a radiação menor que 700 W/m², a ventilação do sistema pode ser influenciada por ventilações do ambiente menores que 2 m/s; porém o uso de chaminé solar é preferível para situações onde a velocidade do ar interno está abaixo de 2 m/s, pois para maiores valores a ventilação cruzada pode ser uma solução mais efetiva e de menor custo (TAN; WONG, 2014, 2013).

Esse resultado é complementado pela pesquisa de Al-Kayiem e Gilani (2014) que obtiveram uma queda de 25% no desempenho do sistema quando sujeito a ventos externos com velocidade entre 1,5 m/s e 6 m/s, estando exposto a uma radiação de 900 W/m². Independentemente desses resultados, o fluxo de ar da chaminé pode ser estimado apenas considerando a radiação solar, as características construtivas da chaminé solar e a temperatura de entrada do sistema e do ambiente externo (DAI *et al.*, 2003). Da mesma forma, Afonso e Oliveira (2000) indicam que, devido a variação do perfil de velocidade dos ventos externos, seus valores podem ser desconsiderados quando avaliado uma chaminé solar, pois sua inclusão pode subestimar os valores de desempenho do sistema.

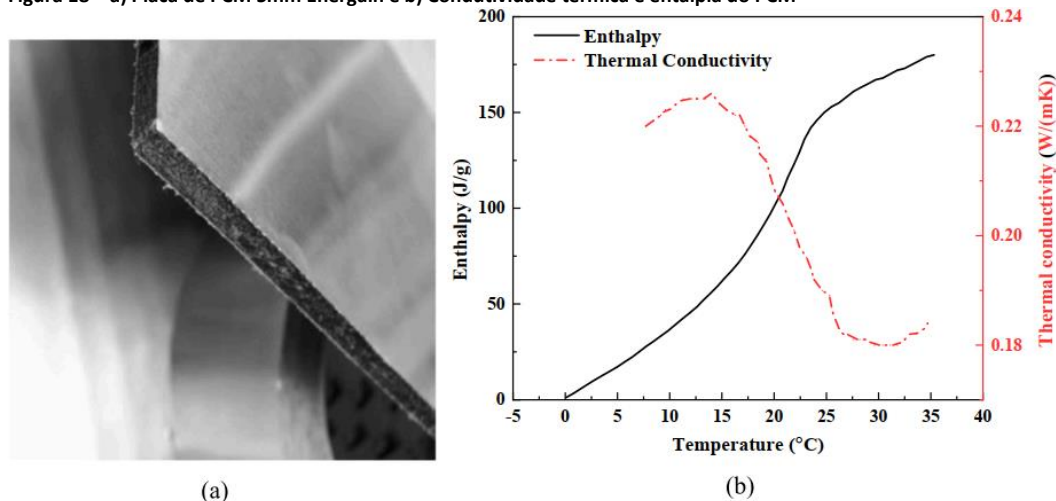
Materiais de mudança de fase

Esta seção utilizou parte do artigo científico “Uso de PCM para edificações em região de clima quente: uma revisão sistemática”, com autoria de Roberta Bastos de Oliveira, Tomaz Silva Gonzales (presente autor) e Michele Tereza Marques Carvalho, publicado na revista Pesquisa em Arquitetura e Construção (PARC), publicado em janeiro de 2021 (DOI: 10.20396/parc.v12i00.8658590)

Materiais de mudança de fase apresentam uma capacidade de armazenamento térmico substancialmente maior que os convencionais (BRITO *et al.*, 2017). Sofrem mudanças cíclicas de estado quando expostos a determinadas condições ambientais, absorvendo ou dissipando grande quantidade de calor, como mostra a Figura 18 (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2010). Tendo em vista a necessidade de construções com eficiência energética e bom desempenho térmico, os PCMs se apresentam como alternativa para aplicação na envoltória das edificações visando a estabilidade térmica das mesmas, sendo apontados por Marin *et al.* (2016) como promissora. Segundo Brito *et al.* (2017), a

utilização de PCMs em edificações é maior no hemisfério norte, havendo poucas informações sobre seu uso em edificações em países tropicais. Entretanto, sabe-se que essas áreas de clima quente e úmido enfrentam o desafio quanto ao consumo de energia do ar condicionado, fator ponderado por Madhumathi e Sundarraja (2014).

Figura 18 – a) Placa de PCM 5mm Energain e b) Condutividade térmica e entalpia do PCM



Fonte: (HU; YU, 2019)

- Classificação:

Os materiais de mudança de fase podem agir como uma espécie de reservatório quase isotérmico de calor. À medida que a temperatura aumenta, os PCMs mudam de fase com uma reação endotérmica. Com a queda de temperatura, os PCMs liberam o calor acumulado com uma reação exotérmica (SOARES *et al.*, 2013). Nesse sentido, podem auxiliar no equilíbrio do desempenho termoenergético de uma edificação.

São classificados com base no estado em que mudam de fase. De acordo com Zhou, Zhao e Tian (2012), os do tipo sólido-líquido são mais adequados para armazenamento de energia térmica, sendo divididos em: orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Os orgânicos são compostos por parafina, ácidos graxos ou por componentes biodegradáveis; os inorgânicos possuem componentes metálicos ou hidratos de sal; e os eutéticos, que são a mistura de dois PCMs, sejam eles orgânicos ou inorgânicos.

A classificação dos PCMs utilizados normalmente não é mencionada por autores, para tanto contou-se com o resumo apresentado por Raoux (2009). Dentre os artigos identificados, a maioria faz a aplicação de PCMs do tipo orgânico, com destaque para o BioPCM, e os que não mencionaram o tipo, focam apenas na variação de temperatura de fusão de acordo com o interesse. Verificou-se que alguns autores avaliaram mais de um tipo: Saikia, Azad e Rakshit (2018) com um orgânico e um inorgânico, Yaz *et al.* (2019) com dois orgânicos e Saikia *et al.* (2020) com quatro orgânicos e um inorgânico.

- Critérios de Seleção:

A escolha do PCM deve se basear nas características termodinâmicas, cinéticas e nas propriedades físico-químicas, com vantagens e desvantagens para cada tipo, resumidas por Zhou, Zhao e Tian (2012) e Soares *et al.* (2013). De um modo geral, como aspectos positivos para a seleção de um PCM devem ser observados: disponibilidade em uma faixa de temperatura ampla, baixa condutividade térmica, alto calor de fusão, baixa mudança de volume, baixo grau de inflamabilidade, não ocorrência de super-resfriamento ou corrosão, além do baixo custo para aquisição e aplicação. Essa escolha do material foi relacionada à disponibilidade dele na região de estudo, como no caso de

Solgi *et al.* (2019b) que retratam a utilização do BioPCM em todas as zonas bioclimáticas da Austrália.

Pode-se também inferir que o aspecto econômico tenha influência. Madhumathi e Sundarraja (2014) fizeram uma comparação de custo entre os PCMs comerciais na Índia, e o polietileno glicol (PEG), BioPCM e PCM com cloreto de cálcio foram os mais acessíveis, contrastando com as parafinas 9 vezes mais caras. Ressalta-se, contudo, que a seleção do PCM deve também se basear nas suas qualidades físicas, químicas, cinéticas e térmicas, visto que a fase de seleção é o fator mais crítico e determinará a sua eficiência no controle da temperatura (ARANDA-USÓN *et al.*, 2013).

- Formas de incorporação dos PCM:

As temperaturas de congelamento e derretimento dos PCMs tendem a mudar ligeiramente quando incorporados nos materiais de construção civil (WAHID *et al.*, 2017). Essa incorporação pode ser feita de três maneiras principais, segundo Hawes, Feldman e Banu (1993): incorporação direta, imersão e encapsulamento (micro ou macro). A incorporação direta é a técnica mais simples, e resume-se na inserção do PCM em pó ou líquido no gesso ou concreto por exemplo, podendo, no entanto, ocasionar incompatibilidade ou vazamento durante a mudança de fase.

A segunda técnica consiste na imersão do material de construção, como gesso ou tijolo, no PCM derretido para absorção nos poros internos, e também pode causar vazamento, prejudicando seu uso a longo prazo. Por fim, no encapsulamento o PCM é envolto por uma camada que pode evitar o problema de vazamento. No macroencapsulamento tem-se tubos, esferas ou painéis com revestimento anticorrosivo, e no microencapsulamento, a camada consiste em um filme polimérico que proporciona uma maior integração com os materiais de construção.

Quanto à forma de incorporação do PCM nos materiais de construção, a maioria dos artigos não mencionou explicitamente a técnica considerada. No entanto, pode-se deduzir pela forma de inserção nos modelos simulados que todos foram considerados como encapsulados, seja por micro ou macroencapsulamento, como em Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019) em que o PCM foi simulado como uma camada da parede e do telhado. Tal fato possivelmente está ligado ao de que as técnicas de inserção direta e imersão impedem a simulação do comportamento do PCM numérica ou computacionalmente, uma vez que as propriedades dos materiais se confundiriam com os da construção, impossibilitando as análises e sua comparação com protótipos.

- Aplicação no envelopamento:

Para os casos que utilizaram painéis ou mantas de PCM microencapsulados, o PCM foi predominante posicionado entre camadas de outros materiais, por ser mais flexível e necessitar de uma melhor ancoragem. Como exemplos, Solgi *et al.* (2019a) usaram uma parede de testes em camadas, sequencialmente com 12mm de argamassa, 50mm de poliestireno, 10mm de BioPCM-24°C e 12 mm de placa de cimento, da camada externa para a interna. Marin *et al.* (2016), Brito *et al.* (2017) e Guarino *et al.* (2015), implementaram PCM nas envoltórias de edifícios leves, permitindo uma redução nas flutuações diárias da temperatura.

Solgi, Fayaz e Kari (2016) apontaram a utilização promissora do PCM no piso, pois atua como uma camada de isolamento e impede a transferência de calor entre o chão e o solo. Em uma análise experimental apenas para a cobertura, Guichard *et al.* (2017) avaliaram o uso de aço galvanizado com uma camada interna de PCM macroencapsulada de 5,26mm de espessura, com uma temperatura de fusão de 23,4°C.

Para avaliar de uma outra forma, Guarino *et al.* (2015) posicionaram 5 camadas de painéis de PCM no lado interior das paredes testadas, cobrindo cerca de 80% da área de superfície da parede.

Outra forma de aplicação é quando se usa placas de gesso ou outro material sólido que possibilita o microencapsulamento em seus poros. Essas placas podem ser posicionadas nas camadas mais internas ou externas do envelope. Biswas *et al.* (2014) utilizaram para seu trabalho dois diferentes drywalls contendo PCM (um microencapsulado e outro do tipo nano-PCM), posicionados em uma camada interna de uma parede. Da mesma forma, Marin *et al.* (2016) instalaram uma placa de gesso com PCM microencapsulado nas camadas interiores das paredes externas e de sua cobertura. Ji *et al.* (2019) compararam dois materiais idealizados convencionados como "PCM sólido" e "camada PCM", posicionados na camada exterior das paredes verticais e cobertura. Iommi (2018) constatou uma diminuição nas pontes térmicas para sistemas construtivos secos de madeira, quando usada uma camada de PCM.

Também pode-se selecionar soluções macroencapsuladas de PCM, quando se utiliza invólucros para conter o material. Tais casos foram mais utilizados em aparatos experimentais, por serem uma solução de baixo custo e fácil manuseio, o que atrai o interesse de pesquisas acadêmicas experimentais. Madhumathi e Sundarraja (2014) utilizaram PCMs (Polietilenoglicol e ácido cúprico) que foram macroincapsulados em tubos de fibra de vidro e inserida em tijolos furados das paredes externas testadas. Com uma abordagem semelhante, Rathore e Shukla (2019) e Rathore, Shukla e Gupta (2020) confeccionaram tubos de alumínio utilizados para macroincapsular PCM que possui uma temperatura de transição de fase entre 29,4°C e 39,1°C, os quais foram inseridos em uma parede de concreto e sua cobertura.

- Aplicações integradas a outras estratégias passivas:

Outras soluções relacionadas à edificação podem estar associadas ao envelopamento da edificação. Muitos sistemas construtivos que utilizam o PCM como acumulador de calor se integram com sistemas mecânicos, como condicionadores de ar, aquecedores de água, trocadores de calor em geral ou mesmo para o resfriamento de placas fotovoltaicas. Porém, este trabalho focou nas estratégias passivas estritamente relacionadas com o envelopamento da edificação. Desta forma, Nematshoua *et al.* (2020) e Nematshoua, Vanona e Orosa (2020) destacam o sombreamento externo como estratégia adicional; Piselli, Castaldo e Pisello (2019) reforçam a observância das propriedades termo-ópticas dos telhados, como refletância e emissividade.

Hu e Yu (2019) investigaram a combinação do telhado com revestimento termocrômico e as paredes com PCM, e Mao e Yang (2020), enfatizam que o ângulo do telhado também influencia na quantidade de radiação a ser absorvida pelo PCM para auxiliar na transferência do calor. Além disso, a orientação da parede para climas quentes também é importante, fator também ponderado por Köse e Manioğlu (2019). (Saikia, Azad e Rakshit (2018) avaliaram diferentes orientações para dois tipos de PCM, e afirmam que o desempenho térmico pode ser maximizado se diferentes PCMs forem utilizados em paredes com orientações distintas. Guichard *et al.* (2017), concluíram que, com a carta psicrométrica de Givoni, o conforto térmico poderia ser alcançado associado à ventilação natural.

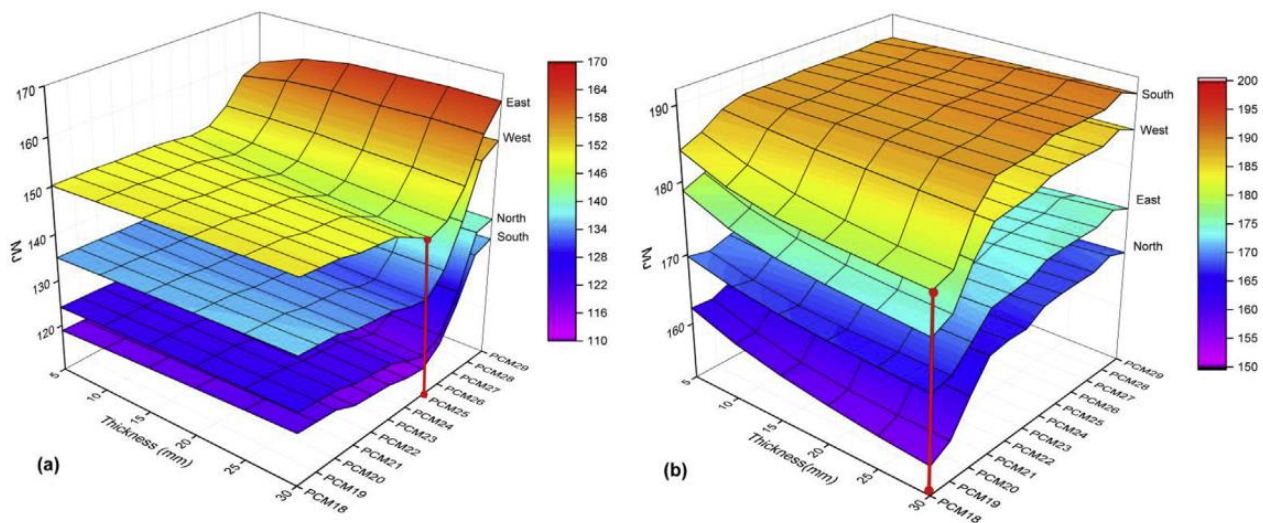
Brito *et al.* (2017), alertam para as proporções de materiais transparentes e opacos, orientações de aberturas envidraçadas e taxa de ventilação. Madhumathi e Sundarraja (2014) também salientam a inclusão da ventilação como parâmetro no modelo de construção. Quanto à ventilação noturna, para os ambientes simulados por Nazi *et al.* (2017), houve compatibilidade da sua associação com o PCM. A ventilação noturna

também é valorizada por Solgi *et al.* (2017) e Solgi *et al.* (2019a) como uma técnica produtiva de resfriamento passivo que demonstra um alto potencial de redução de cargas de resfriamento.

- Espessura:

Estudos constatam que a utilização do PCM em edificações de clima quente ocasiona significativas reduções do consumo de energia. Além disso, é praticamente unânime a conclusão de que o aumento da espessura da camada de PCM, independente do seu local de aplicação, contribui para a economia de energia total da edificação. Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019) ponderam que para um volume constante de PCM, a eficiência energética aumentou com uma camada mais fina de PCM e uma maior área de superfície coberta com PCM. A Figura 19 representa a relação de diferentes variáveis associadas com a mudança de espessura de uma placa PCM.

Figura 19 – Impacto da orientação, temperatura de transição e espessura no consumo energético nas cidades a) Alice Springs e b) Hobart



Fonte: (SOLGI, Ebrahim *et al.*, 2019)

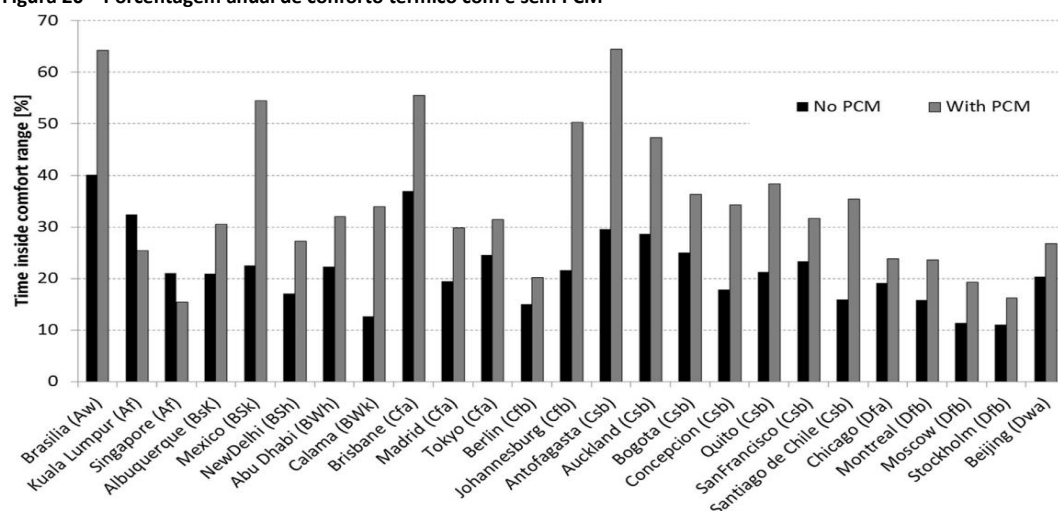
- Temperatura de mudança de fase:

A temperatura de fusão foi essencial para um desempenho otimizado do sistema. Seus valores estão relacionados com o posicionamento do PCM nas camadas de materiais, sua espessura, condições climáticas externas e *set-point* interno, além de outras características ambientais e construtivas, como orientação da edificação, incidência direta solar e cor da superfície. Ji *et al.* (2019) enfatizam que a seleção do PCM deve ser feita pensando no completo processo de fusão-solidificação, aproveitando ao máximo a capacidade do material para a redução da carga térmica do ambiente. Complementando, Lei, Yang e Yang (2016) concluíram que, para PCMs aplicados nas superfícies externas, a melhor temperatura de transição é a menor que permite o processo de fusão-solidificação completamente. Para os PCMs aplicados internamente, a melhor temperatura de fusão é a temperatura média das superfícies internas.

Além disso, segundo Solgi *et al.* (2019a), com o uso de materiais de isolamento, obtiveram a temperatura otimizada de fusão para regiões de clima quente e seco fica em torno de 1°C abaixo da temperatura de *set-point*. Da mesma forma, Biswas *et al.* (2014) encontraram que temperaturas de *set-point* próximas a de fusão apresentaram um comportamento melhor para o verão, onde possui maiores temperaturas. Assim, Memarian *et al.* (2018) determinaram que, para as estações quentes, a melhor escolha de PCM foi em torno de 29°C de temperatura de fusão, sendo que Bimaganbetova,

Memon e Sheriyev (2019) encontraram a temperatura para mudança de fase no valor de 26°C. Brito *et al.* (2017) ponderam contudo que, um maior valor de capacidade de armazenamento térmico latente pode compensar um ponto de fusão menos adequado.

Figura 20 – Porcentagem anual de conforto térmico com e sem PCM



Fonte: (MARIN *et al.*, 2016)

- Desempenho termoenergético:

O fator econômico não pode ser ignorado, como ponderado por Ji *et al.* (2019). Sovetova, Memon e Kim (2019) calcularam um período de retorno de 60 anos, avaliado como economicamente viável. (Solgi, Memarian e Moud (2018) reiteram, contudo, que por mais que o uso de PCMs leve a uma economia de energia significativa, com os custos de energia e PCMs no Irã, o uso desses materiais não se apresenta como econômico.

Alguns autores apresentaram os resultados em termos de redução percentual no consumo energético: Hu e Yu (2019) calcularam de 1% a 7% menos energia se o PCM for posicionado como camada interna; Ji *et al.* (2019) mostraram possível queda de 20,9%; Sovetova, Memon e Kim (2019) indicaram uma redução de temperatura de 2,04°C, equivalente a uma redução no consumo energético entre 17,97% a 34,26%; Bimaganbetova, Memon e Sheriyev (2019) um consumo energético menor entre 16,58 a 68,63%; Memarian *et al.* (2018) mensuraram 15% e Akeiber *et al.* (2017) de 45%.

Rathore e Shukla (2019) identificaram uma redução de temperatura interna do ambiente entre 7,19% e 9,18%, e de carga térmica do ambiente em 38,76%. Lei, Yang e Yang (2016) detectaram redução nos ganhos de calor de 21 a 32% com o uso de PCM na envoltória da edificação. Rathore, Shukla e Gupta (2020) mostram uma redução na temperatura de pico interna durante todo o ano, variando de 0,2°C a 4,3°C e uma redução percentual na amplitude térmica interna variando de -2,43% a 51,3%. A Figura 20 mostra o impacto do uso de PCM no tempo em conforto do usuário em ambientes internos.

2.6 Referencial para modelagem e simulação dos objetos

Ventilação Natural

O uso da ventilação natural tem sido cada vez mais comum quando se é necessário estratégias que envolve climatização por ventilação no projeto de escolas. Quando a ventilação natural é analisada, um dos objetivos é capacitar modelos preditivos na determinação de taxas de fluxo de ar através de aberturas na edificação, podendo saber

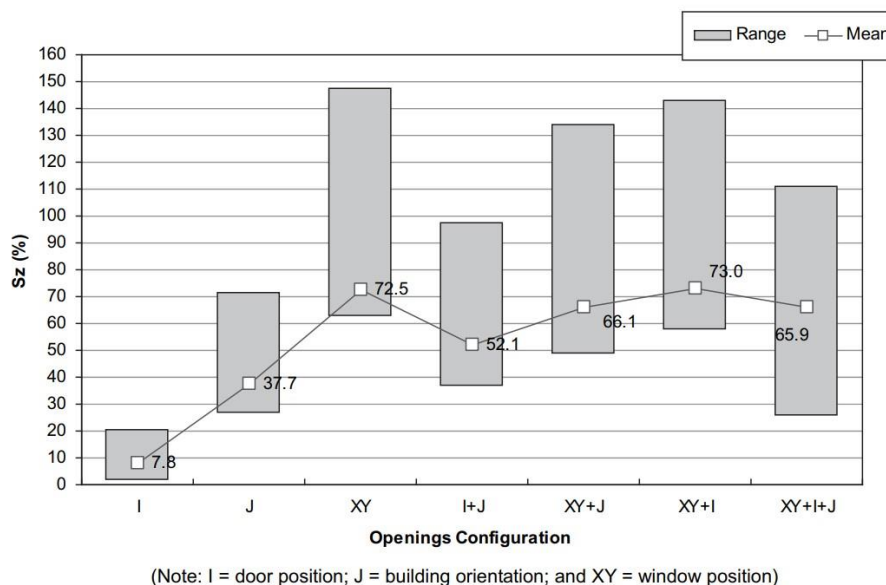
a influência de certos parâmetros para o controle da correta quantidade de ar que o ambiente necessita para sua climatização.

Em edificações de baixa altura, o uso de estratégias para ventilação natural pode salvar acima de 30% do consumo energético para o arrefecimento de ambientes, quando as condições externas estiverem favoráveis para o resfriamento natural (FRIESS; RAKHSHAN, 2017), necessitando determinar as épocas do ano que são mais efetivas na climatização natural, para cada contexto climático, quando a temperatura externa é menor que a interna, por exemplo, para o caso de climas quentes.

As condições externas, além da temperatura do ambiente, também influenciam no desempenho de climatização natural por ventilação, como condições de umidade, velocidade dos ventos e sua direção, radiação solar etc. Devido a imprevisibilidade dessas condições, o aproveitamento da ventilação é dificultoso, necessitando de formulações complexas para sua determinação. Para isso, o uso de dados climáticos horários e seu tratamento através de programas computacionais pode aumentar o potencial de previsão, avaliando analiticamente essas condições influenciadas também pela arquitetura do ambiente (YIN *et al.*, 2010).

Questões sobre a configuração da edificação – como orientação e forma geométrica da edificação, volume interno do ambiente, posicionamento de portas e janelas, ventilação cruzada ou janelas únicas – influenciam na taxa de fluxo de ar pelas aberturas, em certo grau por parâmetro. Gao e Lee (2011) realizaram uma análise de sensibilidade, determinando que o desempenho da ventilação natural era mais sensível à mudança de posicionamento das janelas, principalmente na direção vertical, também confirmado por (YIN *et al.*, 2010). A figura 22 ilustra esses resultados.

Figura 21 – Análise de sensibilidade para o desempenho de ventilação natural por posicionamento de aberturas



Fonte: (GAO; LEE, 2011)

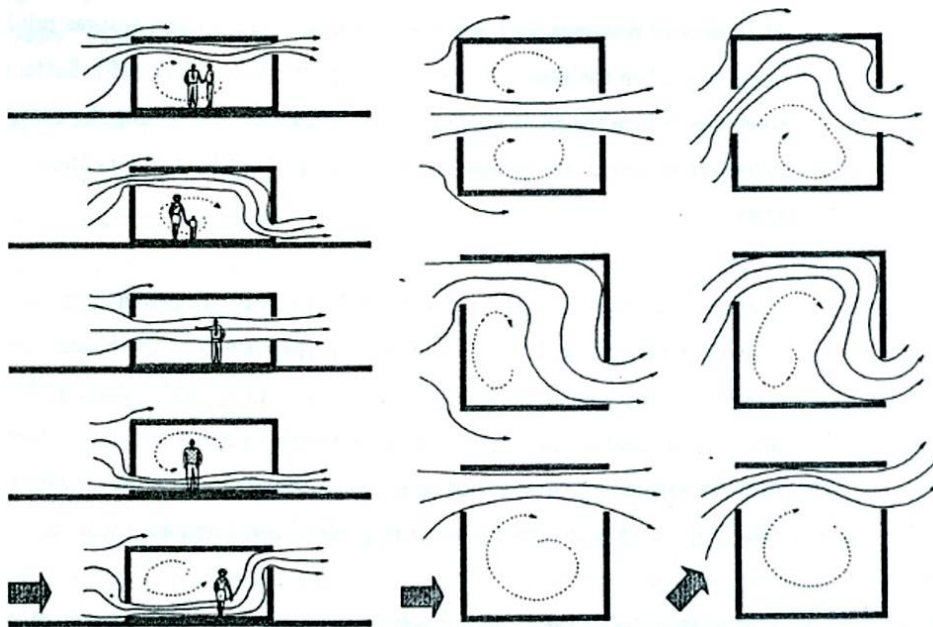
Outro importante fator é o uso de ventilação cruzada sobre o uso de janelas dissociadas. A ventilação natural por janelas isoladas possui menor eficiência que por ventilação cruzada, pois a mesma janela funciona como entrada e saída do fluxo de ar, podendo gerar recirculação e mistura de ar. Também são mais influenciados pelos efeitos instáveis de turbulência, o que pode diminuir a taxa de trocas de ar (ETHERIDGE, 2000). Algumas estratégias foram propostas para calcular as taxas de trocas de ar em janelas

dissociadas, porém a compreensão sobre a interação entre os efeitos de vento e chaminé necessitam de um amplo desenvolvimento (LARSEN; HEISELBERG, 2008).

O uso de ventilação cruzada é uma boa solução para o uso de ventilação natural em ambientes escolares, sendo que alguns fatores influenciam sua performance. Aldawoud (2017) concluiu que a razão entre as janelas de entrada e saída de ar possuem efeitos significantes na taxa de fluxo de ar dentro do ambiente, sendo que aberturas com pequenas taxas de abertura e razão entre entrada e saída resultam em baixo desempenho.

O posicionamento das janelas responsáveis pelo ar de saída na ventilação cruzada, segundo Perén et al., (2015), não impacta significativamente a taxa volumétrica do ar, aumentando em apenas em 2%, e com efeito negligenciável na velocidade do ar. Porém, o posicionamento pode gerar zonas de recirculação e que as linhas de fluxo não efetivamente circulam pelo ambiente, como mostra a figura 23. Sobre os coeficientes de pressão, seus valores variam consideravelmente com a porosidade da parede, porém seus valores são não-uniformes para as paredes de entrada com porosidade acima de 10% (KARAVA; STATHOPOULOS; ATHIENITIS, 2007).

Figura 22 – Ilustração dos das linhas de fluxos de ventilação por aberturas posicionadas em diferentes configurações



Fonte: (GIVONI, 1976)

Conforto Térmico

A ventilação natural pode prover não apenas melhora na qualidade do ar interno, por insuflar ar externo, mas também pode contribuir com melhores condições de conforto ambiental térmico. Além disso, devido à alta densidade de ocupação em salas de aula, às condições e oportunidades limitadas de adaptação, e à influência negativa que um ambiente termicamente insatisfatório pode influenciar no desempenho na aprendizagem dos alunos, prover condições de conforto em edificações educacionais é de grande importância.

Ambientes escolares apresentam alguns desafios na determinação de níveis de conforto térmico, pois possuem características dinâmicas em relação a períodos específicos de ocupação ao longo do ano, diferentes atividades e vestimentas de seus ocupantes, além de muitas vezes utilizarem sistemas híbridos de climatização, ou

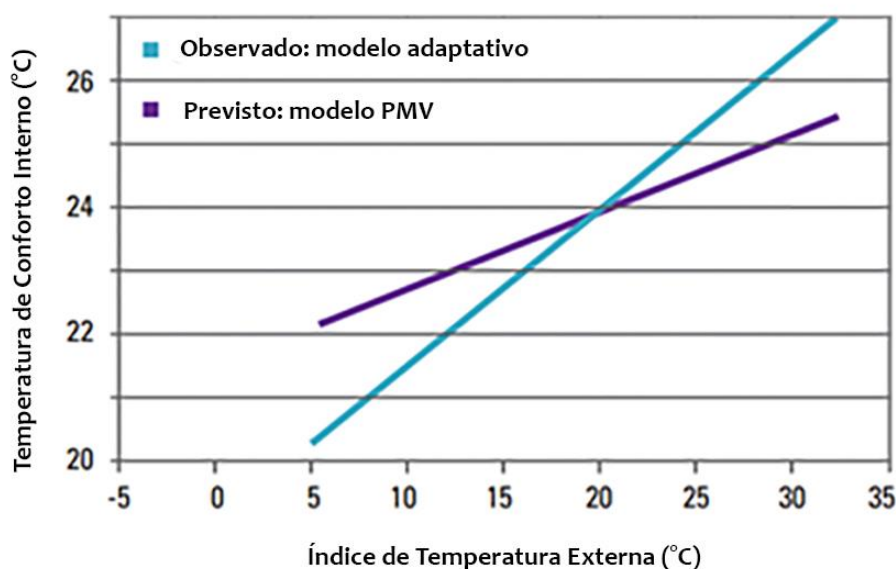
mesmo apenas o uso de ventilação natural (ZOMORODIAN; TAHSILDOOST; HAFEZI, 2016). Com isso, condições de conforto são apenas atingidas quando se é utilizado modelos holísticos que consideram a complexidade e especificidade de edificações educacionais.

Mesmo possuindo uma boa adequação para os casos de edificações para escritório e serviços, certos parâmetros dos modelos adaptativos de conforto necessitam de ajustes para escolas e centros educacionais. Teli, Jentsch e James (2012) avaliaram que, para ambientes escolares, a temperatura neutra derivada do voto atual da sensação média térmica foi 4°C abaixo de prevista pelo PMV e 2°C para o modelo adaptativo, após a avaliação estatística de um questionário aplicado aos alunos. (CORGNATI; FILIPPI; VIAZZO, 2007) também constataram que em climas mais quentes os ocupantes preferem ambientes, segundo a descrição, “levemente frios” e para climas mais frios, “levemente quentes”.

Existem duas grandes categorias quando se trata de modelos de conforto térmico: o modelo racional RTC (*Rational Thermal Comfort*), mais conhecido como modelo PMV (voto médio previsível ou *Predicted Mean Vote*), e o modelo adaptativo ATC (*Adaptive Thermal Comfort*). Apesar do modelo RTC ter sido baseado em estudos conduzidos em estudantes dentro de contextos climáticos controlados, sua capacidade de avaliar precisamente os níveis de conforto térmico em condições reais em uma sala de aula ainda é reduzida (TER MORS *et al.*, 2011). Entretanto, o modelo adaptativo tem apresentando bons resultados na avaliação e melhoria das condições de conforto.

A ASHRAE (*The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) disponibiliza a abordagem adaptativa em uma de suas normas. A resposta dos ocupantes em relação a sensação térmica depende do clima externo ao prédio, o que difere de ocupantes de edifício com sistema central de HVAC (ANSI/ASHRAE, 2010). Isso significa que para ocupantes de edifícios climatizados passivamente por ventilação natural localizados em uma região de clima quentes estarão mais adaptados a se sentirem confortáveis a temperaturas mais altas, de acordo com a temperatura externa.

Figura 23 – Comparação das faixas de temperatura de conforto entre o modelo adaptativo e PMV

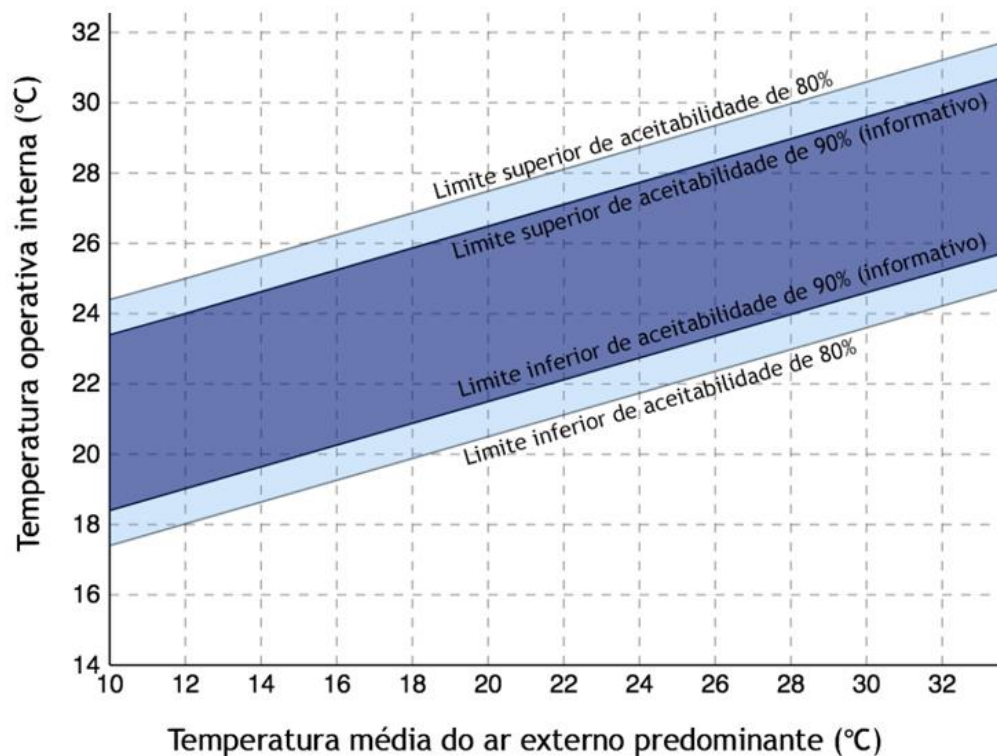


Fonte: (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997)

Este fenômeno foi observado nos dados coletados no projeto de pesquisa RP-884, encomendado pela ASHRAE (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997), onde os ocupantes foram separados em duas categorias: em climatização ativa por ar-condicionado e em climatização passiva por ventilação natural. O primeiro caso foi avaliado pelo modelo PMV e o segundo pelo modelo adaptativo. Como resultado, ocupantes de edifícios que utilizam ventilação natural se adaptam a faixas mais amplas de temperatura para o conforto quando comparado aos climatizados por ar-condicionado (figura 24).

Nesta norma, a ASHRAE determinou taxas de satisfação de conforto térmico para os ocupantes, onde 80% é usado para aplicações gerais e 90% é utilizado para níveis mais altos de conforto desejados. Para este caso, não há limites para umidade relativa e velocidade do ar interno, o que significa que não existe barreira para uma quantidade de renovações de ar por hora no ambiente, o que ajuda o projeto que utiliza a ventilação natural. O gráfico é representado pela figura 25.

Figura 24 – Gráfico da faixa de conforto adaptativo, com aceitabilidade 80% e 90%



Fonte: (ANSI/ASHRAE, 2010)

Assim, a norma apresenta um gráfico que apresenta faixas de aceitabilidade para conforto adaptativo, com um valor de 80% para atingir condições mínimas normativas, e 90% em caráter informativo. A temperatura média do ar externo é um parâmetro fundamental para se determinar o conforto térmico neste modelo, sendo determinada pela média mínima de 7 dias, ou máxima de 30 dias antecedentes ao dia em questão, segundo a seguinte formulação:

$$t_{mpa(out)} = 0,34t_{od-1} + 0,23t_{od-2} + 0,16t_{od-3} + 0,11t_{od-4} + 0,08t_{od-5} + 0,05t_{od-6} + 0,03t_{od-7} \quad (1)$$

onde,

$t_{mpa(out)}$ = temperatura média predominante do ar externo (°C);

t_{od-1} = temperatura média do dia anterior ao dia em questão (°C);

t_{od-2} = temperatura média do dia anterior ao dia em questão ao dia anterior (°C), e assim por diante.

Já a temperatura operativa pode ser formulada pela seguinte equação:

$$t_o = \frac{t_{mr} + t_a \sqrt{10v}}{1 + \sqrt{10v}} \quad (2)$$

onde,

t_{mr} = temperatura média radiante (°C);

t_a = temperatura do ar (°C);

v = velocidade do ar (m/s).

Contexto climático de Brasília-DF

- **Clima:**

Segundo Peel, Finlayson e McMahon (2007), que fizeram uma atualização do mapa de tipos climáticos de Köppen-Geiser, a América do Sul possui a predominância de climas tropicais “A” (60,1%), temperados “C” (24,1%) e árido “B” (15,0%), se desmembrando em alguns tipos. Brasília está inserida na zona “Aw” no Brasil (RIBEIRO, J. F., & WALTER, 1998), porém sua altimetria faz inserir outros tipos de clima de forma específica em seu território, o tropical de altitude “Cwa”, quando entre 1000 metros e 1200 metros, e “Cwb”, quando acima dos 1200 metros.

O clima de Brasília possui duas estações bem definidas, a estação chuvosa no verão e seca no inverno. Segundo Ferreira (1965), o período quente e úmido ocorre entre os meses de outubro e abril, com uma temperatura média de 22°C, e o período seco ocorre entre os meses de maio e setembro, com uma temperatura média de 19°C, possuindo acentuada variação de temperatura ao longo do dia.

Por estar em uma região de planalto e em um sítio convexo, Brasília está sujeita a influência dos ventos com direção predominantes (CODEPLAN, 1984). Segundo Silva (2013), com uma velocidade média entre 2 m/s e 3 m/s, os ventos de frequência média anual despontam do leste de forma moderada e constante, menos para o verão, despontando do noroeste com maior frequência.

Brasília possui elevados índices de irradiação solar, possuindo uma irradiação solar horizontal média de 5,8 kWh/m² por dia, equivalente ao das regiões Sudeste e Nordeste, segundo a (WWF-BRASIL, 2016). Sua insolação anual é de 2600 horas anuais, sendo 160 horas mensais em média para o período chuvoso e 290 horas para o período seco, também acompanhando a tendência de duas estações bem definidas (SILVA, 2013).

- **Arquivo Climático:**

Segundo Maciel (2002):

Para uma caracterização mais detalhada e precisa do clima local é necessário conhecer a distribuição ao longo do ano dos dados climáticos relevantes para a edificação, a temperatura, a umidade, a insolação, direção e velocidade dos ventos e precipitações. Através do conhecimento detalhado destas variáveis ao longo do ano torna-se possível prever percentuais para as estratégias bioclimáticas mais adequadas aquela situação climática. Dessa forma, é possível

trabalhar os dados climáticos para a cidade de Brasília e juntamente com a utilização de meios gráficos que sintetizem o resultado das observações, caracterizar o clima voltado para o projeto bioclimático.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza um compilado com dados climáticos obtidos pelas suas estações meteorológicas automáticas. Suas medições juntam as médias dos últimos 10 anos, para informações sobre suas temperaturas, umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, irradiação solar, entre outras. Contudo, diversos dados, principalmente para os valores sobre irradiância solar, possuíam dados não registrados ou atrasos no horário de pico máximo.

Para isso, o LabEEE propôs correções de radiação global horizontal e de temperatura de bulbo seco nos arquivos de 2012 e de nebulosidade para 2018, preenchendo os valores inexistentes ou incorretos, e tornando os (SCHELLER *et al.*, 2015). Os arquivos climáticos do INMET foram compilados em um arquivo digital com o formato “.EPW”, adequados para o uso em programas de simulação computacional do comportamento térmico de edificações, como o *EnergyPlus*. O arquivo pode ser obtido no seguinte website:

<http://www.climate.onebuilding.org/>. Acessado em 02/03/2021

- Tipo de Solo

Segundo o Mapa Pedológico do Distrito Federal (REATTO *et al.*, 2004), a principal classe de solo de Brasília é o latossolo, ocupando 54,5% de sua área. A categoria mais comum do latossolo na região é o latossolo vermelho, com 38,92% área. São solos com alta profundidade, acima de 2 metros, e não hidromórficos, com alta permeabilidade de água, variando sua capacidade de água disponível de acordo com sua profundidade, podendo ser excessiva, forte ou acentuadamente drenados.

Guimarães (2002) estudou o solo do *campus* da Universidade de Brasília e seccionou-o em 3 níveis de profundidade: de 0 m a 3,5 m o solo tem características argilosas, destacando a zona de transição que ocorre entre 3 m e 4 m de profundidade, onde ocorre maior variação de umidade, sendo o trecho com bioturbação mais acentuada, podendo ser caracterizada como areia. De 3,5 m a 8,5 m as propriedades físicas gradualmente se alteram, com a porosidade gradualmente diminuindo, possuindo qualidade argilosa. Abaixo de 8,5 o solo possui textura mais siltosa, com porosidade homogênea mais elevada.

As propriedades higrótérmicas do solo também variam segundo sua profundidade. Souza Jr. (2017) avaliou as propriedades do solo de Brasília e verificou o aumento da umidade do solo com o aumento da profundidade, obtendo valores perto de 30% aos 4 metros de fundura. Sua temperatura média é de 26°C no mês de dezembro, decrescendo significativamente a partir dos 2 metros de profundidade, possuindo uma oscilação perto de 1°C ao longo do dia.

Souza Jr. (2017) também determinou certos parâmetros térmicos do solo. O peso específico natural permanece perto de 14,5 kN/m³ – entre 3 m e 6 m de profundidade – e capacidade de calor específico em torno de 1550 J/(kg.K) para as mesmas profundidades. A condutividade térmica se inicia com os valores entre 1,086 W/m.K e 1342 W/m.K na profundidade 0 m, sobe para a faixa entre 1,648 W/m.K e 1,780 W/m.K e permanece nela até os 6 m de profundidade. A difusividade térmica do solo em estudo está perto de 5,0 m².s⁻¹.10⁻⁸ (BRUM, 2007).

Ferramenta computacional para modelagem e simulação de edificações

Uma das ferramentas computacionais utilizada na simulação energética predial é o *EnergyPlus*, o qual é um software desenvolvido pelo Departamento Americano de Eficiência Energética e Energia Renovável (EERE), baseado em outros dois programas: o *Blast* e o *DOE-2*. O *EnergyPlus* é considerado um programa confiável pois permite “a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo capaz de reproduzir os efeitos de inércia térmica e validado pela ASHRAE Standard 140” (ABNT, 2013, p.20).

Por si só, o *EnergyPlus* é um programa de simulação responsável apenas pelos cálculos de carga térmica, necessitando de um programa de interface gráfico, com o intuito de modelar o prédio estudado. Assim, é necessário um outro programa, sendo um dos mais conhecido para a interface gráfica o *DesignBuilder*, corrigindo as limitações do *EnergyPlus* em relação ao processo de modelagem gráfica. O *DesignBuilder* também possui uma ferramenta de otimização, que vai além de uma solução paramétrica, avaliando centenas de milhares de possibilidades de configurações, inputs e outputs, respeitando as restrições impostas, gerando a melhor forma de integração das soluções adotadas.

Contudo, o *EnergyPlus* – e consequentemente o *DesignBuilder* – não possui, por padrão, ferramentas de simulação para a integração de elementos passivos no modelo da edificação, mas possui a possibilidade da adição de tais soluções (ENERGYPLUS, 2020). As soluções PCM e trocador de calor solo-ar já possui modelos inseridos no *EnergyPlus*. O *EnergyPlus* também possui um módulo nativo que simula o comportamento da chaminé solar através de um modelo analítico, chamado *ThermalChimney*, porém tal módulo se limita a uma parede Trombe, de construção vertical, sem possibilidade de análise para um sistema inclinado, e o módulo não se integra com a ventilação natural pelas aberturas do modelo.

Projeto padrão de escola da FNDE

O Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) possui um acervo de projetos arquitetônicos de espaços educativos, desenvolvido pela Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura (CODIN), para atender o Plano de Ações Articuladas (PAR), em seu item 4, “infraestrutura física e recursos pedagógicos”. Tal estratégia é para “desenvolver ações que contribuam para a ampliação da oferta, permanência e melhoria das condições escolares” (FNDE, 2014, p.1). Com isso, o FNDE busca ambientes escolares que propiciam um melhor desempenho de aprendizagem, e como já mencionado anteriormente escolas que possuem projetos que atendam as necessidades de conforto ambiental podem contribuir para o aumento deste parâmetro.

Um dos projetos é disposto de 5 blocos de atividade: salas de aula, serviços, administração, biblioteca e multiuso. O projeto também possui quadra poliesportiva coberta e vestiários. A figura 26 ilustra a distribuição espacial dos blocos.

Figura 25 – Etapas da metodologia proposta

Distribuição dos blocos
por atividades:

- Sala de Aula
- Serviços
- Administração
- Biblioteca
- Multiuso



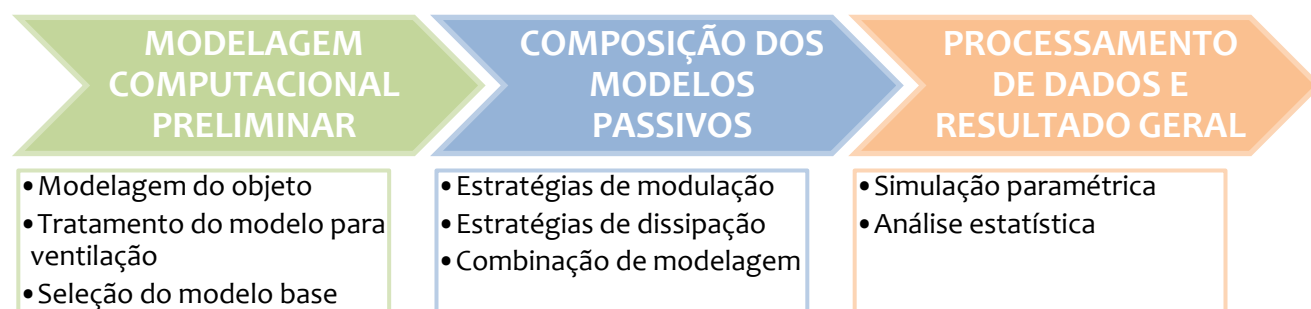
Fonte: (LOPES, 2020)

3 Materiais e Métodos

Este trabalho segue os procedimentos de pesquisa desenvolvidos por Tian Tan (2019), a qual propôs o desenvolvimento de uma metodologia para análise de sensibilidade e incertezas multidisciplinar para o consumo energético, iluminação natural e conforto térmico de uma edificação. Aqui, o resultado avaliado é o de conforto térmico, mais especificamente o de conforto adaptativo, seguindo o modelo proposto pela ASHRAE, e as análises também avaliarão como as integrações de estratégias passivas afetam esse resultado.

A metodologia apresentada está dividida em 3 etapas (Figura 26): M. A primeira etapa tem como propósito produzir o primeiro modelo base de simulação a partir de um projeto padrão de escola. A segunda etapa tem como propósito o ajuste do primeiro modelo padrão para receber as estratégias passivas de climatização, isoladas e integradas, e produzir novos arquivos de modelagem. A terceira e última etapa tem como propósito o desenvolvimento das simulações paramétricas dos arquivos produzidos na segunda etapa, gerando os dados de saída e realizando as análises estatísticas propostas.

Figura 26 – Etapas da metodologia proposta



Fonte: O autor

Importante constar que parte da primeira etapa da metodologia (seção modelagem do objeto) baseia-se nos trabalhos de Lopes (2020), sendo que muitos dos detalhes de configuração do modelo computacional e dados de entrada foram desenvolvidos por seu trabalho, sendo avaliado o mesmo objeto de estudo: Escolas padrão 5 e 9 salas do FNDE.

Como esclarecimento, as estratégias passivas de climatização serão avaliadas por meio de modelos computacionais validados por pesquisas externas a este trabalho. O módulo *EarthTube* do *EnergyPlus*, que modela trocadores de calor terra-ar (EAHE), foi desenvolvido e validado por Lee e Strand (2006), por meio de dados experimentais com uma discrepância insignificante com o modelo de Al-Ajmi.

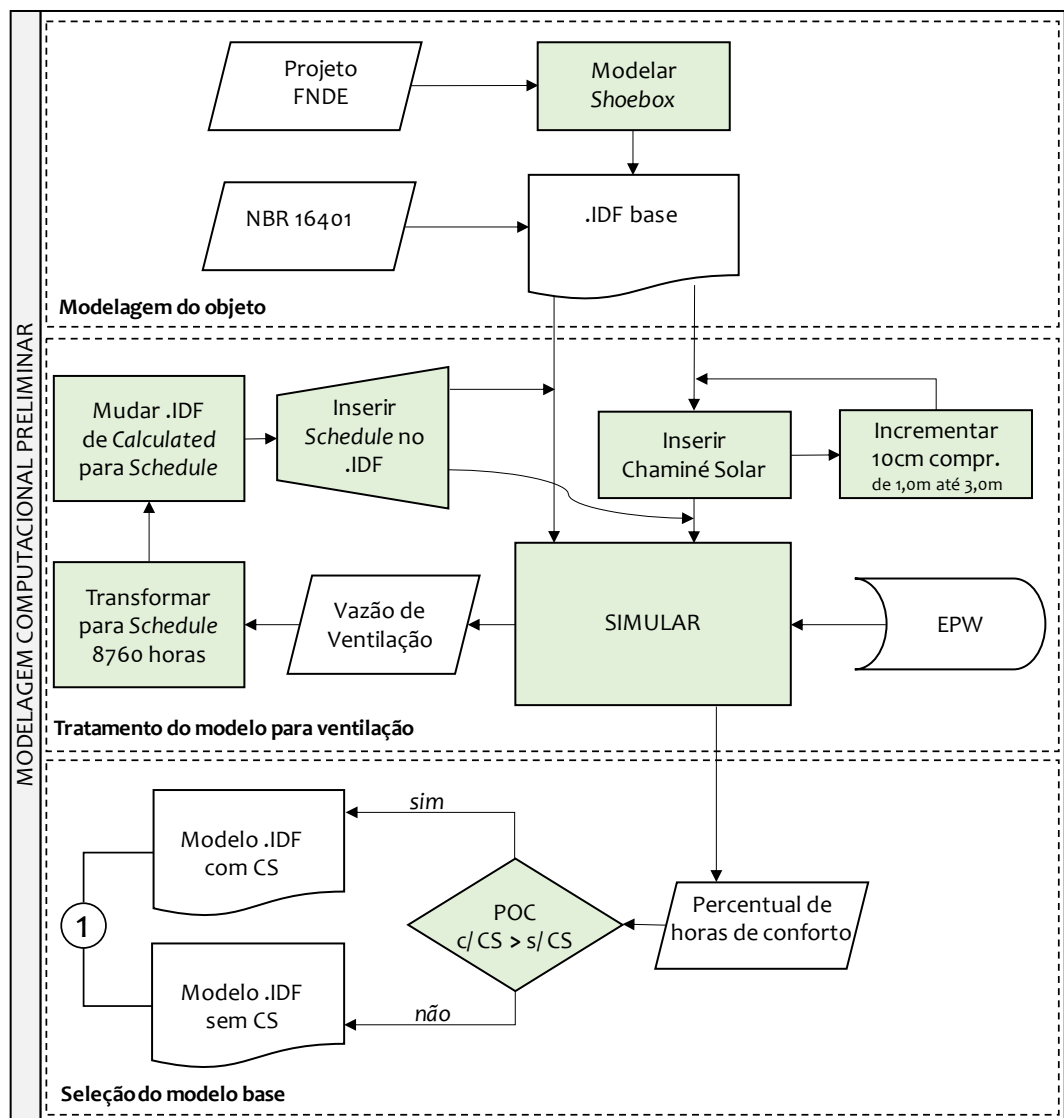
No procedimento para a chaminé solar no *EnergyPlus*, que foi desenvolvido e validado por Neves (2012), notou-se que os dados experimentais obtiveram uma boa concordância com o modelo matemático proposto. Para os materiais de mudança de fase (PCM), Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012) validaram o uso do material no *EnergyPlus*, obtendo baixos valores de raiz do erro quadrático médio.

As etapas da metodologia serão detalhadas nas seções seguintes.

3.1 Modelagem Computacional Preliminar

Nesta primeira etapa, desenvolve-se o modelo base para a integração das estratégias passivas de climatização. As características construtivas são retiradas de um projeto padrão do FNDE, o qual é modelado de forma simplificada, seguindo as diretrizes da ASHRAE para modelagem do tipo *Shoebox*. As características de ocupação são obtidas da norma ABNT NBR 16401 e do livro ASHRAE Handbook – Fundamentals (2017), as quais, somadas ao modelo construtivo, viabilizam a elaboração do primeiro arquivo .IDF. Tal arquivo recebe duas abordagens de ventilação natural – uma por janelas e outra por chaminé solar. Seleciona-se o que obtiver um melhor percentual de horas de conforto para conter os dados de ventilação do arquivo padrão, utilizando-o para os próximos passos da metodologia proposta. A Figura 27 representa o fluxograma dessa primeira etapa metodológica.

Figura 27 – Fluxograma da etapa de modelagem computacional preliminar



Fonte: O autor

Modelagem do objeto

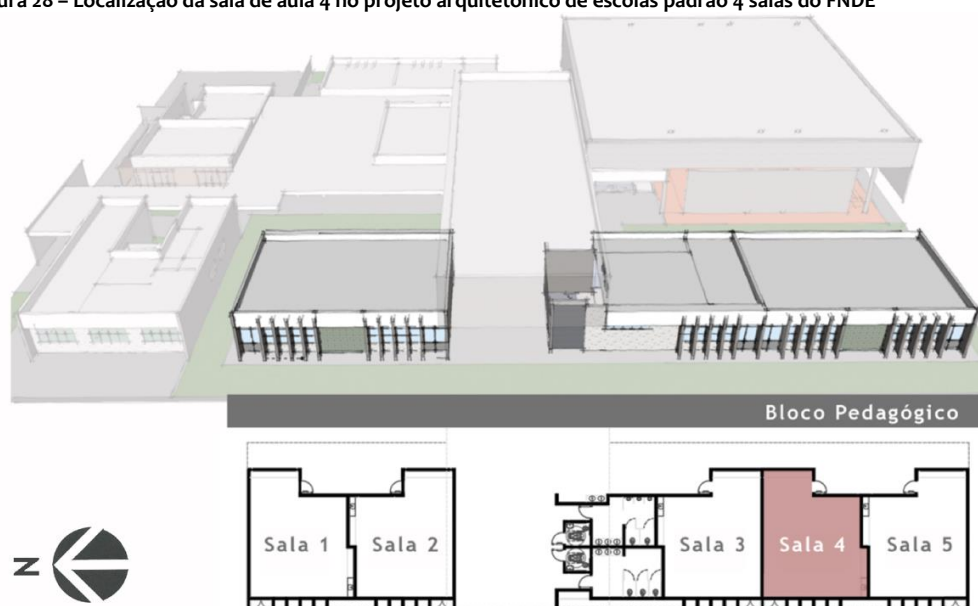
O projeto é analisado para a cidade de Brasília-DF, que se encontra na latitude 15,87° e longitude -47,93°, com uma altitude de 1060 metros. O arquivo climático, utilizado em

todas as simulações, encontra-se no formato .EPW, do tipo *Typical Meteorological Years* (TMY), com dados derivados dos 15 anos entre 2003 e 2017. O nome do arquivo é:

- BRA_DF_Brasilia-Kubitschek.Intl.AP.833780_TMYx.2003-2017.epw

O projeto utilizado como base para as modelagens é o de escolas padrão 5 e 9 salas do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), desenvolvido pela Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura (CODIN). Avalia-se especificamente a sala de aula 4 (Figura 28), que se encontra no bloco pedagógico 2. A orientação solar segue os parâmetros de Lopes (2020), com as diretrizes da NBR 15575-1 para as condições mais desfavoráveis de simulação: fachada de maior área envidraçada voltada para a direção oeste. Tal condição serve para o caso verão, que avalia o desempenho térmico para as temperaturas mais quentes, principal preocupação para os horários de operação da escola.

Figura 28 – Localização da sala de aula 4 no projeto arquitetônico de escolas padrão 4 salas do FNDE



Fonte: (LOPES, 2020). Adaptado

Os materiais utilizados na fachada seguem as indicações da Coordenação de Desenvolvimento e Infraestrutura (CODIN), utilizando vedações de alvenaria e assentamento de argamassa com traço de 1:2:8, além de textura projetada. A cobertura do modelo utilizou os mesmos materiais construtivo do projeto da CODIN, que são chapas metálicas de aço galvanizado para telha sanduíche com camada isolante entre as chapas, com preenchimento de PIR (espuma rígida de políisocianurato). Também é considerado a camada de ar abaixo da estrutura de telha sanduíche, finalizando com a camada mais interna de forro mineral. Para as janelas, o vidro selecionado é o comum incolor de 6mm. Os detalhamentos de cotagem e materiais construtivos se encontram no Anexo A – Cotagem de dimensões.

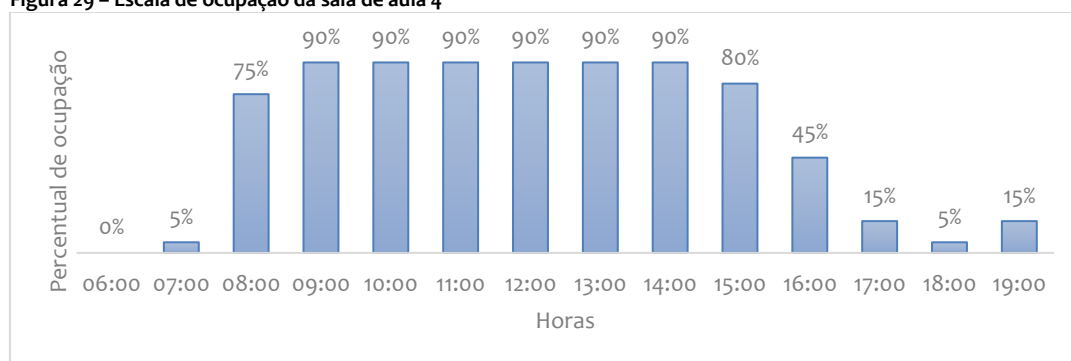
A modelagem do objeto de estudo é computada por meio do software *EnergyPlus*, versão 9.3, com o auxílio do software *DesignBuilder* para a modelagem tridimensional. O modelo da zona estudada é simplificada utilizando o mesmo método de Lopes (2020), aplicando o ajuste *simple box* (ou *shoobox*), proposto pela ASHRAE Standard 209 (2018), para simplificação do modelo.

Além disso, a simulação também segue a orientação da NBR 15575, em que unidades separadas por paredes de germinação possuam a mesma condição térmica de suas zonas adjacentes. Para isso, as paredes laterais da sala de aula que fazem divisão com as outras salas são consideradas como adiabáticas. Os detalhamentos de dimensionamento, entradas de dados para materiais construtivos e implantação de elementos de sombreamento são obtidos no Apêndice A – Modelagem computacional DesignBuilder.

Para desenvolver os parâmetros de ocupação do modelo, utiliza-se a norma ABNT NBR 16401-3, especificamente, quando especificado, para Estabelecimentos de ensino – Sala de aula (ABNT, 2008). Outras informações são retiradas do livro *ASHRAE Fundamentals – SI edition* (ASHRAE, 2017), o qual contém dados que o software *DesignBuilder* utiliza em suas bibliotecas de referência.

A rotina de ocupação foi definida pela CODIN para ocorrer entre às 06:00 horas e 19:00 horas (funcionamento para ensino integral), sendo seu percentual adaptado de uma rotina proposta pela ASHRAE (Figura 29). Seguindo a NBR 16401-3, a densidade de ocupação para salas de aula será no valor de 35 pessoas por 100 metros quadrados, e a vazão de ar de renovação mínima para qualquer estratégia que insufla ar no ambiente será no valor de 5,0 L/s (nível 1 para vazão de ar exterior).

Figura 29 – Escala de ocupação da sala de aula 4



Fonte: O autor

O nível de atividade é o de *sentado, escrevendo*, com um calor total emitido de 108 W/pessoas, e um fator de ajuste de 0,75, devido aos usuários serem majoritariamente crianças. As roupas de inverno possuirão 1,0 clo e as de verão 0,5 clo. O ambiente não possuirá ganhos de calor por equipamentos eletrônicos ou fontes de calor por iluminação, apenas os ganhos pelos ocupantes (0,3767 pessoas/m² ou 26 pessoas).

Todos os parâmetros construtivos e operacionais servirão como dados de entrada para o modelo, que será composto no software *DesignBuilder*. Uma vez configurado, o modelo será exportado como arquivo .IDF, capaz de realizar uma simulação para as 8760 horas de um ano. Tal arquivo serve de base para os próximos passos.

Tratamento do modelo para ventilação

O arquivo .IDF gerado foi ajustado no software *EnergyPlus* para que o programa seja capaz de analisar a sua ventilação natural por meio do módulo *AirFlowNetwork*. O método de inicialização é o *LinearInitializationMethod* e o algoritmo para superfícies internas utilizado é o *Detailed*, e para superfícies externas o *TARP (Thermal Analsis Research Program)*. O coeficiente de descarga possui valor de 0,6, e os coeficientes de

pressão utilizados são apresentados na Tabela 2, os quais foram obtidos no modelo de Lopes (2020) para as mesmas condições.

Tabela 2. Coeficiente de pressão das superfícies com aberturas para ventilação cruzada

		Ângulo de incidência da ventilação							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Coeficientes de pressão	Cobertura	-0,37	-0,55	-0,44	0,29	0,6	0,29	-0,44	-0,55
	Fachada frontal	-0,37	-0,55	-0,44	0,29	0,6	0,29	-0,44	-0,55
	Fachada posterior	-0,71	-0,56	-0,67	-0,56	-0,71	-0,56	-0,67	-0,56

Fonte: O autor

A metodologia utilizada para avaliar a chaminé solar nesse estudo foi desenvolvida por Neves (2012), modelada e simulada no software *EnergyPlus*, por meio de sua ferramenta para cálculo de fluxo de ar *AirflowNetwork*, com as mesmas configurações de simulação do último ajuste, porém alterando o tipo de zona térmica para *cavity*. Os coeficientes de pressão (Tabela 3) foram adaptados segundo os valores determinados por Neves (2012).

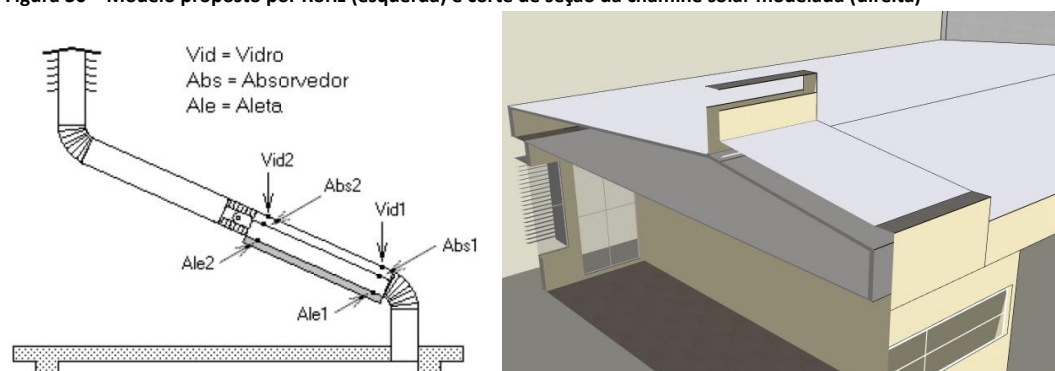
Tabela 3. Coeficiente de pressão das superfícies com aberturas para chaminé solar

		Ângulo de incidência da ventilação							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Coeficientes de pressão	Cobertura	0,60	0,29	-0,44	-0,55	-0,37	-0,55	-0,44	0,29
	Fachada frontal	-0,19	-0,11	-0,09	0,45	0,71	-0,11	-0,09	0,45
	Face frontal CS	-0,67	-0,50	-0,02	0,87	0,77	-0,50	-0,02	0,87
	Face posterior CS	0,93	0,71	-0,02	-0,3	-0,59	-0,3	-0,02	0,71

Fonte: O autor

O modelo computacional tridimensional segue a configuração do sistema proposto por Roriz (2010), como mostra a Figura 30 (esquerda). As dimensões e posicionamento da chaminé solar considerou as limitações do tamanho da sala de aula e de sua cobertura, com o intuito de, quando em funcionamento, substituir a janela da fachada posterior para ventilação cruzada. As dimensões podem ser conferidas no Apêndice A – Modelagem computacional *DesignBuilder*.

Figura 30 – Modelo proposto por Roriz (esquerda) e corte de seção da chaminé solar modelada (direita)



Fonte: (RORIZ, 2010)

A Figura 30 (direita) apresenta a implementação da chaminé no modelo que será simulado. As configurações geométricas e seleção de materiais seguem as recomendações do referencial bibliográfico e complementadas pelas análises paramétricas de Neves (2012). A largura da chaminé foi analisada nos resultados entre

os valores de 1,0 metro e 3,0 metros, alterando gradualmente a largura da chaminé em 10 centímetro, totalizando 21 modelagens e simulações. Os resultados de vazão de ventilação do ambiente para cada incremento são guardados. A Tabela 4 resume as características construtivas definidas.

Tabela 4. Características construtivas da chaminé solar modelada

Vidro	Low-e (baixa emissividade)
Material da Placa	Alumínio (pintura preto fosco)
Isolante	Poliuretano
Lacuna (m)	0,3
Comprimento (m)	3,0
Extensor (m)	2,0
Inclinação (°)	8

Fonte: O autor

Após as simulações utilizando o *AirFlowNetwork*, os dados de ventilação natural são tratados para que não seja necessário utilizar o módulo nas simulações futuras, por demandar um alto custo computacional e não ser compatíveis com o módulo *EarthTube*, como já descrito na seção 2.6.

Assim, o modo de simulação para ventilação foi alterado de *Calculated* (*AirFlowNetwork* ativo) para *Scheduled* (*AirFlowNetwork* inativo), onde a ventilação é computada por um valor base ajustado por uma escala de operação. Os valores de ventilação já extraídos na primeira simulação são transformados para serem contidos como uma escala horária de operação, em formato padronizado para leitura pelo *EnergyPlus*, do tipo *Schedule:Compact*, com a seguinte formulação:

$$F_{escala} = \frac{Ventilação_{hora[i]}}{Ventilação_{máxima}} \quad (3)$$

onde,

F_{escala} = fração da ventilação, entre os valores de 0 a 1;

$Ventilação_{hora[i]}$ = valor absoluto da ventilação na hora i ;

$Ventilação_{máxima}$ = valor máximo da ventilação entre todas as horas do ano.

Como são 8760 horas para cada arquivo simulado, os códigos de escala horária foram produzidos por meio de um algoritmo em Python para automatizar o processo. A escala deve obedecer a linguagem de texto que o *EnergyPlus* utiliza para seus processos. Com a escala formatada, insere-se o *schedule* manualmente no arquivo .IDF como objeto de referência *ZoneVentilation:DesignFlowRate*.

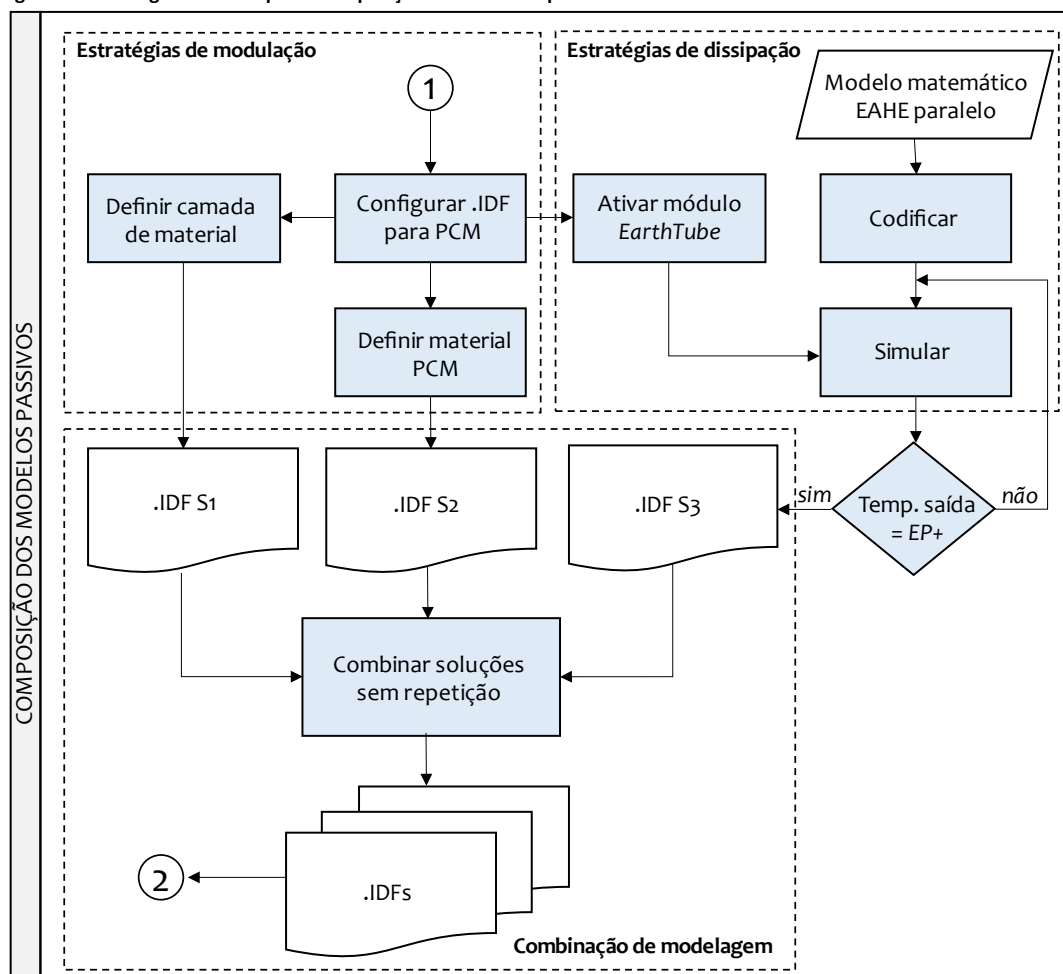
Seleção do modelo base

Os valores de conforto de ambas as estratégias de ventilação são comparados para determinar qual que possui o maior percentual de horas de conforto (POC) anual. As simulações com a chaminé solar retornarão 21 valores, para cada incremento de largura da chaminé, selecionando o que obtiver o melhor desempenho de conforto. O modelo sem chaminé solar retornará 1 valor. Assim, após a comparação, o modelo que possuir melhor POC serve de base para as próximas modelagens e simulações, com a modo de cálculo de ventilação do *EnergyPlus* permanecendo modo *Schedule*.

3.2 Composição dos Modelos Passivos

A segunda etapa tem por finalidade desenvolver os arquivos .IDF com as estratégias passivas de climatização (isoladas e combinadas) implementadas no modelo. Primeiramente, o arquivo .IDF da etapa anterior é modificado para que seja capaz de simular materiais construtivos do tipo PCM. Esse arquivo implementa as camadas de material comuns e de PCM, assim como para as simulações, utilizando o módulo *EarthTube*, do *EnergyPlus*. Ademais, um modelo matemático de um trocador de calor solo-ar, do tipo tubulação em paralelo, foi codificado em Python para que o *EnergyPlus* seja capaz de realizar sua análise. Assim, definido os materiais e os parâmetros da tubulação, 3 arquivos .IDF são produzidos com as estratégias isoladas, as quais, quando combinadas, produzem outros 4 arquivos .IDF, com estratégias combinadas. Esses arquivos são utilizados nas simulações paramétricas na próxima etapa. A Figura 31 representa o fluxograma do processo descrito.

Figura 31 – Fluxograma da etapa de composição dos modelos passivos



Fonte: O autor

Estratégias de modulação

Primeiramente, configura-se o arquivo .IDF para poder receber materiais de mudança de fase, mantendo essas configurações para soluções que também não utilizam o material, com o intuito de gerar conformidade entre simulações. O algoritmo utilizado para as simulações é o *CondFD*, sendo a opção para o modelo de diferenças finitas implícitas o *Fully Implicit*.

O tempo de cada iteração foi configurado para um minuto, pois o algoritmo de diferença finita funciona com maior precisão para intervalos de simulação menores (TABARES-VELASCO; CHRISTENSEN; BIANCHI, 2012). O PCM utilizado possui histerese em valor negligenciável, pois a ferramenta de cálculo não possui capacidade para simular precisamente esse tipo de material específico. O critério de convergência para a temperatura de superfície de face interna selecionado é configurado para 0,002. Todos esses valores são recomendados para simular materiais de mudança de fase com uma maior precisão de resultados (DESIGNBUILDER, 2019).

As duas estratégias passivas de modulação de calor analisadas envolvem materiais construtivos da parede da edificação. A primeira estratégia envolverá o uso de blocos de cerâmica ou concreto, com isolamento térmico ou não, visando avaliar sua resistência térmica e sua capacidade térmica. Assim, buscou-se diferentes tipologias construtivas para que se possa avaliar uma boa extensão de valores. A Tabela 5 apresenta as tipologias que servirão como limites das extensões desses valores.

Tabela 5. Propriedades físicas das tipologia construtivas de referência

	Mínimo	Máximo
Resistência térmica ($m^2.K/W$)	0,23 (Concreto maciço 10 cm)	1,89 (Placa de gesso 1,25cm Lã de rocha 7,5cm Placa cimentícia 1cm)
Capacidade térmica ($kJ/m^2.K$)	99 (Gesso interno fino 0,2cm Bloco cerâmico 9x14x24cm Argamassa Externa 2,5cm)	292 (Argamassa interna 2,5 cm Bloco concreto 19x19x39 cm Argamassa Externa 2,5 cm)

Fonte: O autor

Para a segunda estratégia, materiais de mudança de fase, utiliza-se uma biblioteca de PCM disponível no software *DesignBuilder*, sendo uma família patenteada chamada BioPCM®, desenvolvida pela *Phase Change Solutions* (PCS). Os parâmetros que variam nessa biblioteca são as temperaturas de mudança de fase, disponíveis entre 21 °C e 29 °C, e capacidade térmica latente, entre 27 kJ/kg e 182 kJ/kg.

Estratégias de dissipação

No arquivo .IDF ajustado, ativou-se o módulo *EarthTube* pelo *EnergyPlus* para analisar a inclusão de um trocador de calor terra-ar no modelo. Para iniciar as configurações desse módulo, é necessário determinar a difusividade térmica do solo em questão. O programa *EnergyPlus* oferece 4 tipos de solo por padrão: *Heavy and Saturated*, *Heavy and Damp*, *Heavy and Dry* e *Light and Dry*. Segundo o manual do programa, esses tipos de solo apresentam as seguintes características térmicas (Tabela 6).

Tabela 6. Características térmicas dos tipos de solos apresentados no software EnergyPlus

Tipo de solo	k_s (W/m.K)	α_s ($m^2.s^{-1}.10^{-7}$)
Heavy and Saturated	2,42	7,81056
Heavy and Damp	1,30	5,5728
Heavy and Dry	0,865	4,45824
Light and Dry	0,346	2,4192

Fonte: O autor

Retirando as informações da sessão 2.6 sobre as características do solo de Brasília-DF, é possível inferir que o tipo de solo se aproxima do padrão *Heavy and Dump*. Também é necessário selecionar o tipo de cobertura do solo. Devido as características da região e do terreno, foi escolhido um solo com cobertura vegetal e levemente úmido, representado pelo tipo *Covered and Moist*.

Com os dados de solo e arquivo climáticos selecionados, o programa auxiliar do *EnergyPlus CalcSoilSurfTemp* calcula três parâmetros importantes para a simulação dos poços canadenses: temperatura média anual da superfície do solo, amplitude média da superfície do solo e constante de fase da temperatura de superfície do solo. Assim, inserindo esses três inputs no programa auxiliar, os resultados são calculados e apresentados na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7. Dados de saída do programa auxiliar CalcSoilSurfTemp

Temperatura média anual da superfície do solo (°C)	24,11
Amplitude média da superfície do solo (°C)	1,15
Constante de fase da temperatura de superfície do solo	146

Fonte: O autor

Agora, o módulo *EarthTube* do *EnergyPlus* analisa linha de tubulação singular, normalmente com grande comprimento e alta velocidade de escoamento, o que pode gerar dificuldades para a execução do projeto devido as perdas de carga. Assim, busca-se uma vazão de ar que se desloca com baixa perda de carga, sendo que as tubulações em paralelo, por reduzir a velocidade do escoamento pelo aumento da área total da seção servem como solução. Com isso, utilizou-se tubulações em paralelo, o qual foi modelado em linguagem Python, com seu desenvolvimento apresentado no Apêndice B – Modelagem matemática do EAHE.

A vazão selecionada baseou-se nos requisitos da norma NBR 16401-3 para estabelecimentos de ensino, sala de aula, o que representa uma troca de ar entre 5,0 L/s.pessoa e 7,5 L/s.pessoa, porém adotou-se um outro limite superior, selecionando uma vazão de 10,0 L/s.pessoa. A tubulação de PVC foi selecionada por ser de baixo custo e de fácil obtenção. A tubulação está em uma profundidade de 4 metros, suficiente para obter resultados satisfatórios sem onerar demasiadamente os custos de sua instalação. Outros dados de entrada para a simulação nesta etapa são apresentados na Tabela 8:

Tabela 8. Características construtivas e operacionais do EAHE

Material da tubulação	PVC	
Condutividade térmica do tubo (W/m.K)	20	
Rugosidade	0,00006	
Profundidade do duto (m)	4	
Diâmetro da Tubulação Coletora (m)	0,4	
Dia de simulação	16 de setembro	
Hora de simulação	18:00	07:00
Temperatura bulbo seco (°C)	30,00	17,58
Umidade relativa (%)	39,24	77,11
Pressão atmosférica (Pa)	90030	89582

Fonte: O autor

Assim, sendo a base de comparação o modelo codificado em Python, avalia-se os casos de tubulação com diâmetros de 0,5 metros a 0,05 metros, sendo que o número de tubulações em paralelo está diretamente vinculado com o valor de seu diâmetro, visando o máximo de tubos inseridos, com o espaçamento entre calhas o dobro do valor de seu diâmetro. Com isso, para um sistema 10x10 metros, o uso de tubos de 0,5 metros gera um sistema de 7 tubos paralelos; e com 0,05 metros, 67 tubos paralelos.

Os resultados obtidos pela simulação no código Python são comparados com os resultados obtidos no software *EnergyPlus*. Caso os valores não estejam próximos um do outro, o comprimento da tubulação é acrescentado ou subtraído no modelo do *EnergyPlus*, iterativamente, até o valor dessa comparação estiver com uma diferença menor que 1% entre os valores mínimo e máximo. O valor do diâmetro da tubulação também é alterado para que a oscilação entre as duas horas avaliadas possua também

um erro minimizado, servindo como ajuste fino. As iterações foram realizadas por meio de um algoritmo que utiliza o método do ponto fixo.

Inserindo os dados de entrada apresentados, o código do modelo é executado buscando as menores e maiores temperaturas de saída da tubulação, avaliando a matriz de resultados pela relação entre vazão e diâmetro da tubulação. A Tabela 9 apresenta os resultados.

Tabela 9. Matriz de dados de saída do código para as condições limites de vazão e diâmetro

		Diâmetro da tubulação paralela (m)		
		0,05	0,25	0,5
Vazão (L/s.pessoa)	5,00	25,05°C	27,67°C	28,06°C
	10,00	25,64°C	27,83°C	28,35°C

Fonte: O autor

Portanto, a menor temperatura obtida, 25,05°C, é resultado a partir de um sistema com tubulações com diâmetro de 0,05 metros e com vazão de 5,00 L/s.pessoa. Esse valor de temperatura é para as 18:00 horas. Para as 07:00 horas, o valor de temperatura é de 22,59°C. Tais valores são utilizados como referência no ajuste iterativo nas simulações pelo *EnergyPlus*. O mesmo procedimento é feito para a maior temperatura obtida.

Após os ajustes, obteve-se um comprimento equivalente da tubulação, no módulo *EarthTube*, no valor de 7 metros, equivalente a maior temperatura, e de 43 metros, equivalente a menor temperatura. Para ambos os casos, o diâmetro da tubulação foi ajustado para o valor de 0,0515 metros.

Combinação de Modelagem

Os arquivos .IDF agora podem ser categorizados por estratégias passivas, já com todos os dados de entrada elaborados nos procedimentos anteriores. O modelo que avalia as configurações de paredes se chama S1, o modelo que avalia os materiais de mudança de fase (PCM) se chama S2, e o modelo que avalia o trocador de calor terra-ar (EAHE) se chama S3.

Porém, dando continuidade ao objetivo de pesquisa, tais modelos são combinados em diversos arquivos .IDF, possível pelas configurações do *EnergyPlus* previamente explanadas. Essa agregação se dá como combinação sem repetição. A Tabela 10 apresenta todas os arquivos .IDF gerados.

Tabela 10. Codificação dos modelos computacionais com estratégias passivas de climatização isoladas e integradas

S1	Parade
S2	PCM
S3	EAHE
S1S2	Parede + PCM
S1S3	Parede + EAHE
S2S3	PCM + EAHE
S1S2S3	Parede + PCM + EAHE

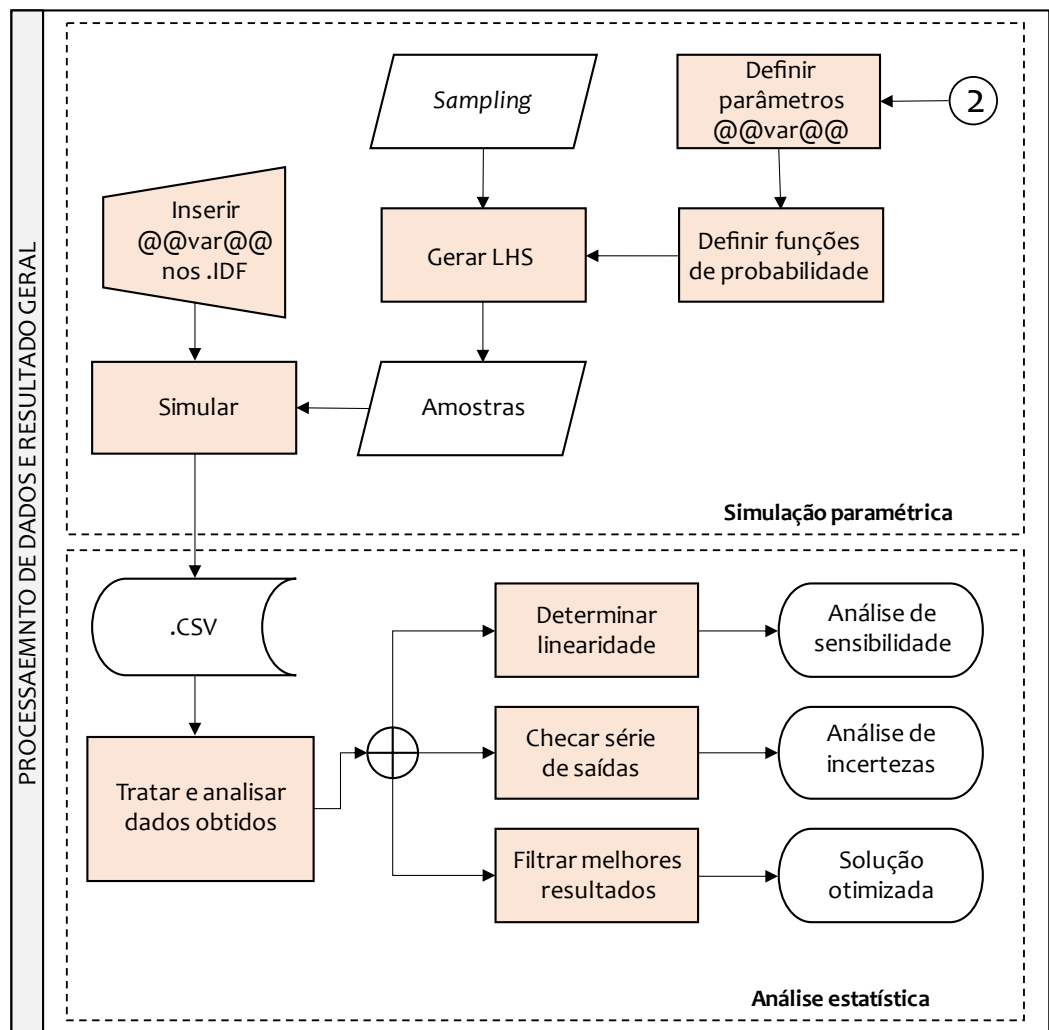
Fonte: O autor

Assim, sete arquivos .IDF foram elaborados, todos com a escala de ventilação gerada pela análise da chaminé solar. Os arquivos diferentes de S1 – paredes sem PCM – quando não analisadas, terão como materiais construtivos a tipologia original do projeto do FNDE. Quando se insere os PCM, tais materiais serão posicionados na camada mais interna das fachadas. Já o EAHE possuirá escala de funcionamento igual a rotina de ocupação da escola, assim com funcionamento pleno entre as 06:00 e 19:00.

3.3 Processamento de Dados e Resultado Geral

A última etapa da metodologia resulta no processamento dos dados obtidos, e em sequência a realização das análises estatísticas. Inicialmente, os parâmetros construtivos das estratégias passivas de climatização são definidos, assim como suas funções de probabilidade. Além disso, o tamanho de amostra é selecionado, possibilitando a aplicação de amostragem por hipercubo latino, resultando numa lista de amostra utilizado na simulação paramétrica. Os códigos para variação de parâmetros construtivos foram inseridos nos arquivos .IDF, possibilitando a realização da simulação. Os resultados de horas em conforto obtidos pela simulação são juntados em um arquivo .CSV. Os dados desse arquivo são tratados para que as análises estatísticas sejam viabilizadas, realizando análise de sensibilidade, análise de incerteza e otimização dos parâmetros, a fim de selecionar a simulação com dados de saída maximizados. A Figura 32 representa o fluxograma desse procedimento.

Figura 32 – Fluxograma da etapa de processamento de dados e resultado geral



Fonte: O autor

Simulação paramétrica

Para cada estratégia de climatização passiva, seleciona-se dois parâmetros que serve de variáveis para as simulações paramétricas. Esses parâmetros foram escolhidos baseados na seção 2.5, para cada estratégia. No caso do PCM, os valores dos parâmetros são considerados discretos, selecionando especificamente os materiais utilizados.

Porém, para os parâmetros das outras estratégias, que são de natureza contínua, selecionou-se uma escala de valores. A tabela a seguir apresenta os parâmetros e seus respectivos valores, representando os dados de entrada. O dado de saída é unicamente as horas em desconforto, pelo método do conforto adaptativo da ASHRAE 55, sendo posteriormente tratados.

Tabela 11. Escala de valores dos parâmetros avaliados na simulação paramétrica

S1	Resistência térmica (m ² .K/W)	0,25; 0,29; 0,33; 0,40; 0,50; 0,67; 1,00; 2,00
	Capacidade térmica (kJ/ m ² .K)	100; 120; 140; 160; 180; 200; 220; 240; 260; 280; 300
S2	Temperatura de mudança de fase (°C)	21; 23; 24; 27; 29
	Capacidade térmica latente (kJ/kg)	27; 51; 91; 182
S3	Vazão volumétrica (m ³ /s)	0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24
	Comprimento da tubulação (m)	7; 11; 15; 19; 23; 27; 31; 35; 39; 43

Fonte: O autor

As funções de probabilidade dos parâmetros selecionados foram consideradas uniformes, pois seus valores já se encontram ajustados, também por não possuírem uma população específica para a análise. As amostragens são aleatórias, com alterações suficientes para que todos os valores de variáveis sejam explorados.

O número de amostras está de acordo com os valores determinados por Tian Tan (2019). Os critérios de seleção são a probabilidade de cometer erro tipo I no valor de 0,05; probabilidade de cometer erro tipo II no valor de 0,099; correlação na hipótese alternativa no valor de 0,2; e probabilidade de rejeitar uma falsa hipótese nula no valor de 0,9. O valor de amostras recomendada pela autora foi de 258 amostras. Para esse trabalho, utiliza-se 400 amostras.

Caso uma análise paramétrica, com todas as combinações possíveis de parâmetros, fosse realizada, o número de possibilidade de resultados seria de 862.400 simulações, número inviável pelo seu consumo computacional. Com isso, um conjunto de variações randômicas dos parâmetros é desenvolvido a partir do método de amostragem hipercubo latino, com uma recomendação do número de simulações sendo o produto da amostragem (400) com o número de parâmetros mais um (7 + 1 – os modelos contam como parâmetro), resultando no valor de 3200 simulações.

Para facilitar na automação das simulações, utilizou-se o software *jEPlus* v2.1, capaz de elaborar o arquivo de amostragem, realizar as modificações dos parâmetros nos arquivos .IDF e simulá-los automaticamente. Porém, primeiramente necessitou-se da inserção manual dos parâmetros codificados (@@par@@) dentro dos arquivos. As simulações foram realizadas em um laptop com processador Intel® Core™ i7-4710HQ 2.50GHz, 16gb de RAM, utilizando 6 núcleos, demandando 31 horas de processamento.

Análise estatística

Os dados de entrada e seus respectivos dados de saída são juntados em um arquivo .CSV, para as 3200 simulações. Os dados foram tratados principalmente para separar as simulações em modelos de estratégia passiva de climatização. Além disso, os resultados por parâmetros são separados e nomes de variáveis e indexações ajustados, necessário para a leitura em outros softwares. Esse tratamento é realizado no software *Excel*. As análises são realizadas no *RStudio*, que utiliza linguagem R.

A primeira análise é a de incertezas das porcentagens de hora de conforto, para estratégias isoladas, combinadas em duas estratégias, e todas as estratégias integradas, plotando os resultados em forma de histogramas. Para auxiliar a visualização, também é plotada a função de densidade para todos os resultados obtidos, avaliando as médias,

medianas, desvio padrão, máximos e mínimos, com o intuito de realizar uma comparação preliminar das estratégias isoladas e combinadas.

Os resultados, então, são separados por modelos de estratégias passivas, e apresentados em um gráfico do tipo *boxplot* (gráfico de caixa) para apreciação da distribuição empírica dos resultados. Após isso, utiliza-se análise de variância (ANOVA) para avaliar se a distribuição de resultados de algum modelo se difere dos demais; e, caso positivo, utiliza-se o teste de Tukey de comparações múltiplas para determinar entre quais grupos a diferença é significativa.

A segunda análise é a de sensibilidade, apurando a linearidade, ou não-linearidade se for o caso, avaliada por medidas de correlação para estimar as forças de associação entre variáveis dependentes e independentes. Para isso, utilizou-se o método de Spearman, que é conveniente para função monotônicas, normalmente o caso para modelagem computacional de edificações (TIAN TAN, 2019). Os valores dos coeficientes de correlação devem estar entre -1 e 1, onde zero significa ausência de correlação. As forças de correlação podem ser descritas por níveis de associação, listadas na Tabela 12, segundo Akoglu (2018).

Tabela 12. Avaliação das forças de correlação

Valor dos coeficiente de correlação (R)(+ e -)	Nível de associação
0,0	Nenhum
0,1 a 0,3	Fraco
0,4 a 0,6	Moderado
0,7 a 0,9	Forte
1,0	Perfeito

Fonte: (AKOGLU, 2018)

Conjuntamente, a fim de confirmar ou rejeitar a hipótese nula do método, o nível de significância (valor-p) é avaliado. Utilizou-se a convenção de que um valor abaixo de 5% (ou $p < 0,05$) é considerado estatisticamente significativo, e um valor acima desse, estatisticamente insignificante.

A terceira análise avalia as extensões de valores dos parâmetros mais favoráveis para a faixa dos 10% melhores resultados, que são os maiores valores para percentual de horas de conforto (POC). Essa análise é dividida entre os 10% dos resultados agregando todos os modelos, e 10% dos resultados segregando os modelos, para avaliar quais valores se destacam após essa filtragem. Tal análise apresenta-se em um gráfico de histogramas.

A partir dos valores mais favoráveis e dos parâmetros correlacionados com os resultados de conforto, sendo utilizados como filtros, busca-se avaliar se tal filtragem pode retornar os melhores casos de POC a partir dos resultados. Tal filtragem é realizada em um gráfico de coordenadas paralelas, utilizada também para se obter a simulação com o melhor resultado de saída.

Para finalizar, os resultados para a simulação com o maior valor de POC são apresentados em um gráfico de modelo adaptativo segundo a ASHRAE 55, inserindo os valores horários de conforto como pontos dentro do gráfico, comparando esse modelo otimizado com o modelo base inicial, a fim de contrastar visualmente a evolução de resultados.

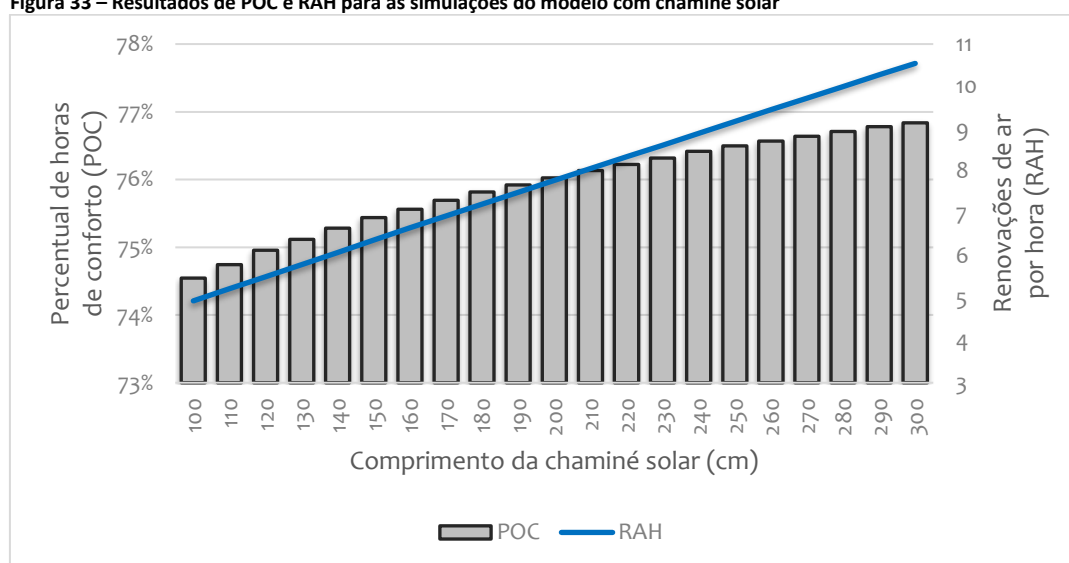
Todos os resultados das análises serão ponderados, interpretados e sintetizados na seção 4.5 – Discussão de Resultados – concordando aos objetivos de pesquisa e realizando uma avaliação crítica dos resultados, suas implicações e limitações, além de fornecer sugestões para trabalhos futuros.

4 Resultados

4.1 Análise de estratégias para ventilação natural

Duas estratégias de ventilação serão avaliadas para selecionar o modelo que será utilizado nas etapas seguintes de modelagem e simulação. Uma será com ventilação natural por ventilação cruzada, por meio do uso de janelas, e o outro será pelo uso de uma chaminé solar em conjunto com uma janela. O segundo caso necessitou a modelagem e simulação de 21 casos, pois alterou-se gradualmente o comprimento da chaminé solar em 10 centímetros, de 1,0 metro até 3,0 metros. A Figura 33 apresenta os resultados de simulação da chaminé.

Figura 33 – Resultados de POC e RAH para as simulações do modelo com chaminé solar



Fonte: O autor

As renovações de ar por hora, à medida que se incrementa o comprimento da chaminé, apresenta um crescimento linear, entre 5 e 10 renovações anuais, aproximadamente. Já o POC apresenta um grau de crescimento maior para os valores de até 200 centímetros, diminuindo sua taxa de crescimento a partir desse valor. Entretanto, verifica-se para seu comprimento máximo o maior valor de POC. A Tabela 13 resume os resultados de simulação para a ventilação cruzada, e para o melhor caso com chaminé solar.

Tabela 13. Comparação de resultados entre modelo com ventilação cruzada e modelo com chaminé solar

	Horas em desconforto	POC
Modelo base – ventilação cruzada	1203,10	72,53%
Modelo ajustado – chaminé solar	1014,57	76,84%

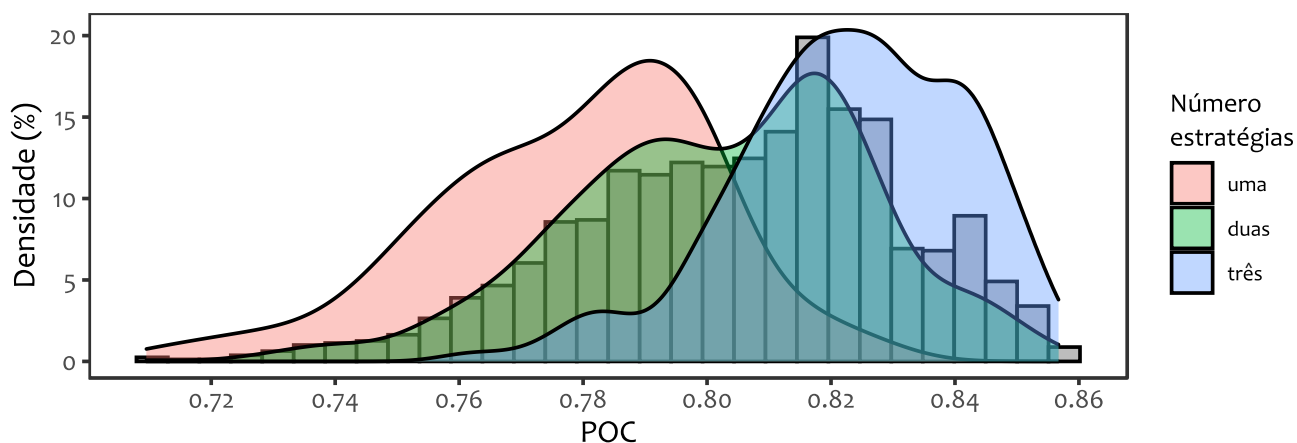
Fonte: O autor

Com isso, a porcentagem de horas ocupadas em conforto (POC) do modelo com chaminé solar é maior do que para o modelo com ventilação cruzada. Com isso, o modelo ajustado foi selecionado, com base no critério de maior POC, para ser o modelo de ventilação que será utilizado nas modelagens e simulações seguintes.

4.2 Análise de Incertezas

Esta seção busca a mensuração das incertezas em relação ao resultado obtido com a simulação computacional da edificação, pelas variações dos parâmetros construtivos, operacionais e físicos das estratégias passivas de climatização. A Figura 34 apresenta a distribuição de resultados por meio da plotagem de barras e funções de densidade. A barra representa todos os resultados, sem agrupamento, e as funções de densidade, dividida em três, apresenta os dados em grupo de número de estratégias. Seu intuito é realçar a diferença entre o uso de soluções isoladas e combinadas.

Figura 34 – Densidade de frequência para o resultado de todas as simulações, com estratégias isoladas e combinadas



Fonte: O autor

O pico de densidade para as estratégias quando isoladas exibe valores visivelmente menores quando comparado com as estratégias combinadas. Já o pico entre as combinadas, assim como para o caso geral, não apresenta distanciamento sobressaído, porém os resultados das combinações de três estratégias se concentram em valores de POC mais altos do que as combinadas com duas soluções. Tanto as combinações com duas estratégias, quanto a de três estratégias alcança os maiores valores de POC.

A Tabela 14 mostra alguns dados de estatística descritiva, os quais são importantes para a análise de incertezas. Para o caso dos modelos com estratégias isoladas, os resultados estão concentrados em um POC de $77,86 \pm 2,26\%$, com um nível de confiança de 68%, sendo que os com duas estratégias combinadas possuem POC de $80,23 \pm 2,43\%$, e os com três estratégias combinadas possuem POC de $82,29 \pm 1,84\%$. Assim, as estratégias combinadas com 2 e 3 soluções apresentam os resultados com maior POC, porém $S_1S_2S_3$ com o grau de incerteza-padrão menor. Importante notar que, enquanto as estratégias isoladas e com duas combinações apresentam valores mínimos próximos, a de 3 estratégias possui valor mínimo distante desses valores.

Tabela 14. Características térmicas dos tipos de solos apresentados no software EnergyPlus

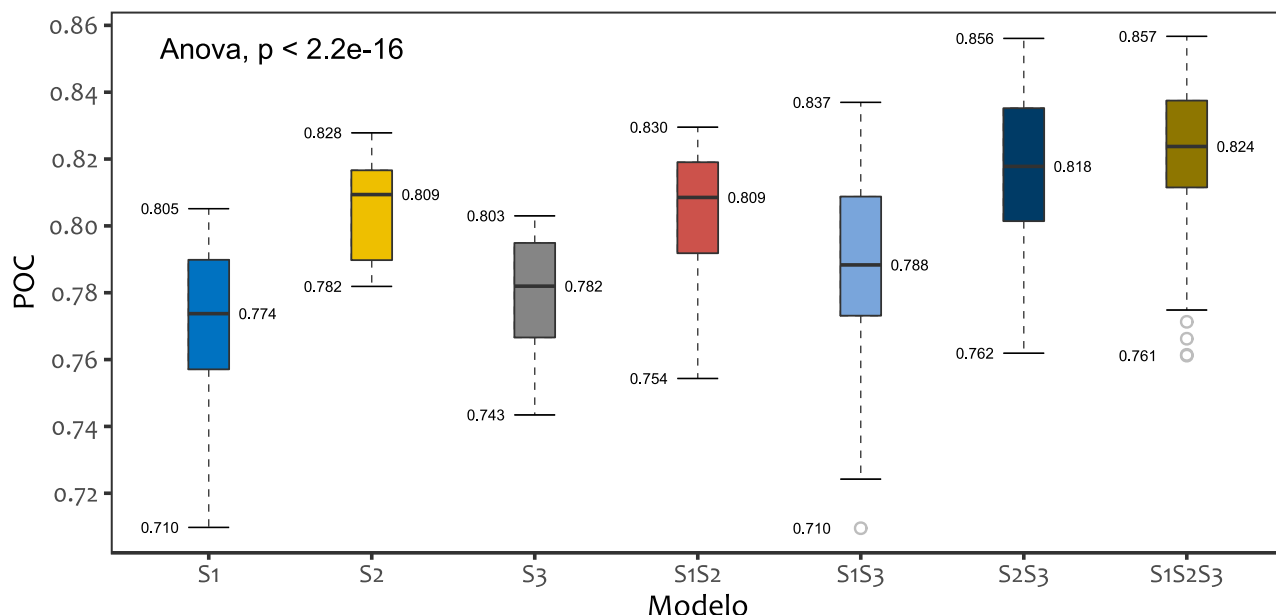
	Média	Mediana	D. Padrão	Mínimo	Máximo
S_i	77,86%	78,22%	2,26%	70,98%	82,79%
$S_i + S_j$	80,23%	80,44%	2,43%	70,95%	85,61%
$S_i + S_j + S_k$	82,29%	82,38%	1,84%	76,12%	85,67%

Fonte: O autor

Como se pode perceber, mesmo com algumas diferenças em certos dados descritivos, não se dá para decidir sobre as diferenças de resultado entre modelos de estratégias,

principalmente para os casos entre duas e três estratégias combinadas. Assim desmembrou-se os resultados agrupando-os em modelos específicos de estratégias isoladas e combinadas. A Figura 35 mostra esses modelos discriminados em diagramas de caixa (*boxplot*), e é realizado uma análise de variância para verificar se algum dos modelos possui diferença estatisticamente significativa entre um outro modelo.

Figura 35 – Resultado para os modelos de estratégia passiva em diagramas de caixa



Fonte: O autor

Entre as soluções isoladas, o uso de PCM (S2) possui a menor extensão de valores, com uma mediana elevada em relação às outras estratégias. Quando combinada com variação de parâmetros da parede, sua mediana permanece a mesma. O PCM possui medianas maior quando combinado com o EAHE, assim como com EAHE mais variação de parâmetros da parede. Já o uso de EAHE (S3) possui resultados de POC baixo, apenas maior que a estratégia para a parede (S1), porém com um aumento evidente quando combinado com outras estratégias. Com a variação da tipologia da parede, todas as estratégias adquirem um aumento na extensão de valores dos seus resultados.

A análise de variância resulta num valor de $p < 0,0001$, denotando que a diferença entre alguns dos modelos de estratégia é altamente significativo. Assim, realizou-se um teste de Tukey como teste de comparações múltiplas (Tabela 15). Como resultado, a hipótese nula foi aceita para apenas três comparações: S1 – S3; S2 – S1S2; e S2 – S3. Para todos as outras estratégias, existe diferença significativa entre seus resultados.

Tabela 15. Teste de Tukey entre as diferentes estratégias passivas de climatização

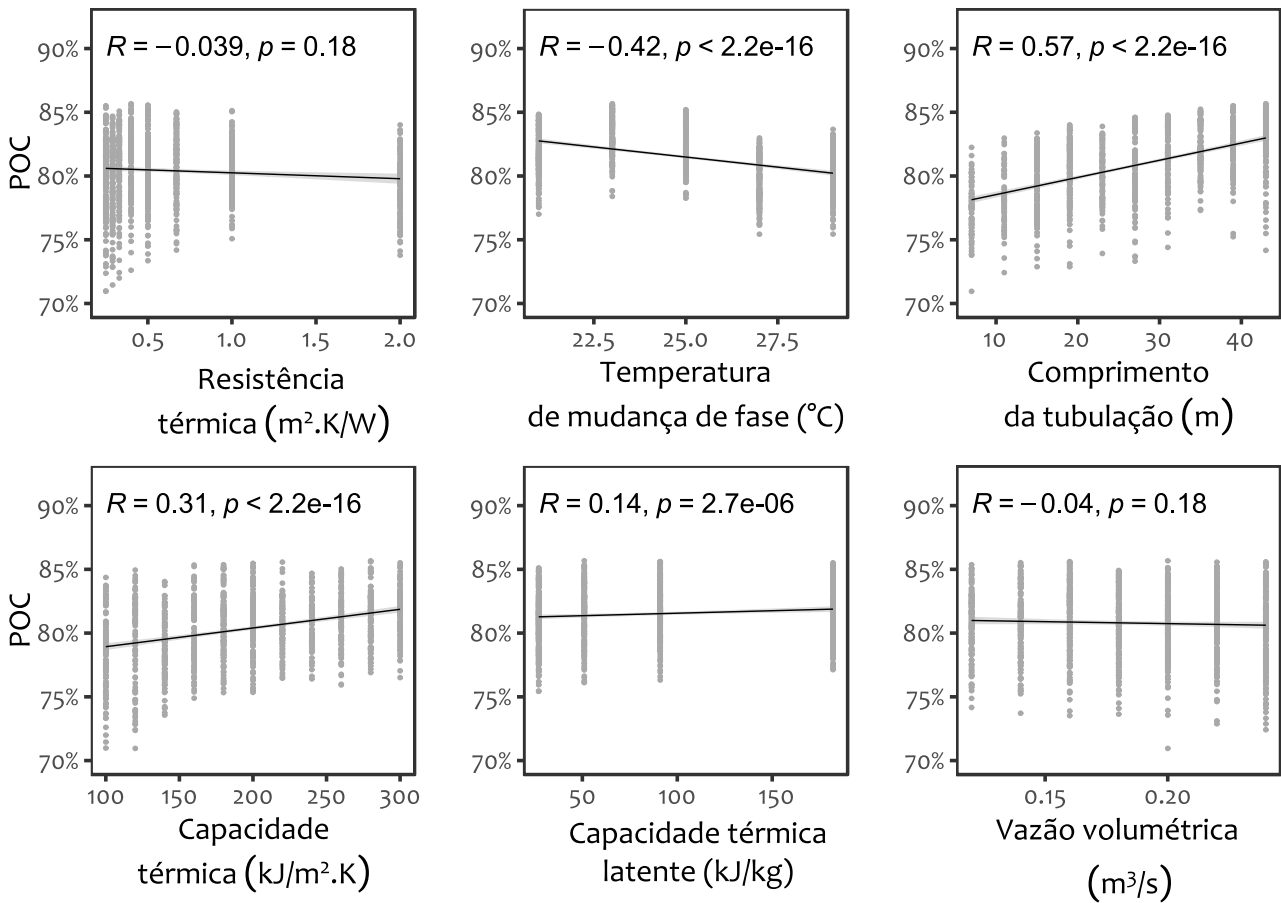
	S1	S2	S3	S1S2	S1S3	S2S3	S1S2S3
S1		<0,0E-07	1,30E-01	<0,0E-07	<0,0E-07	<0,0E-07	<0,0E-07
S2	***		4,90E-05	1,00E+00	1,56E-02	1,98E-01	2,59E-03
S3		***		<0,0E-07	1,56E-02	<0,0E-07	<0,0E-07
S1S2	***		***		0,00E+00	<0,0E-07	<0,0E-07
S1S3	***	*	*	***		<0,0E-07	<0,0E-07
S2S3	***		***	***	***		6,8E-4
S1S2S3	***	**	***	***	***	***	

Fonte: O autor

4.3 Análise de sensibilidade

Para a análise de sensibilidade, selecionou-se o método de Spearman, onde se avaliará a força de correlação entre a variável dependente e a variável independente. Junto com essa análise, também será verificado o nível de significância p , onde a hipótese nula considerada é a de que os parâmetros relacionados com as estratégias não influenciam nos níveis de conforto térmico da sala de aula. A Figura 36 apresenta os resultados de todas as estratégias passivas, isoladas e combinadas, sem um tipo específico de grupamento.

Figura 36 – Análise de sensibilidade para os parâmetros das estratégias, reunindo todos os resultados



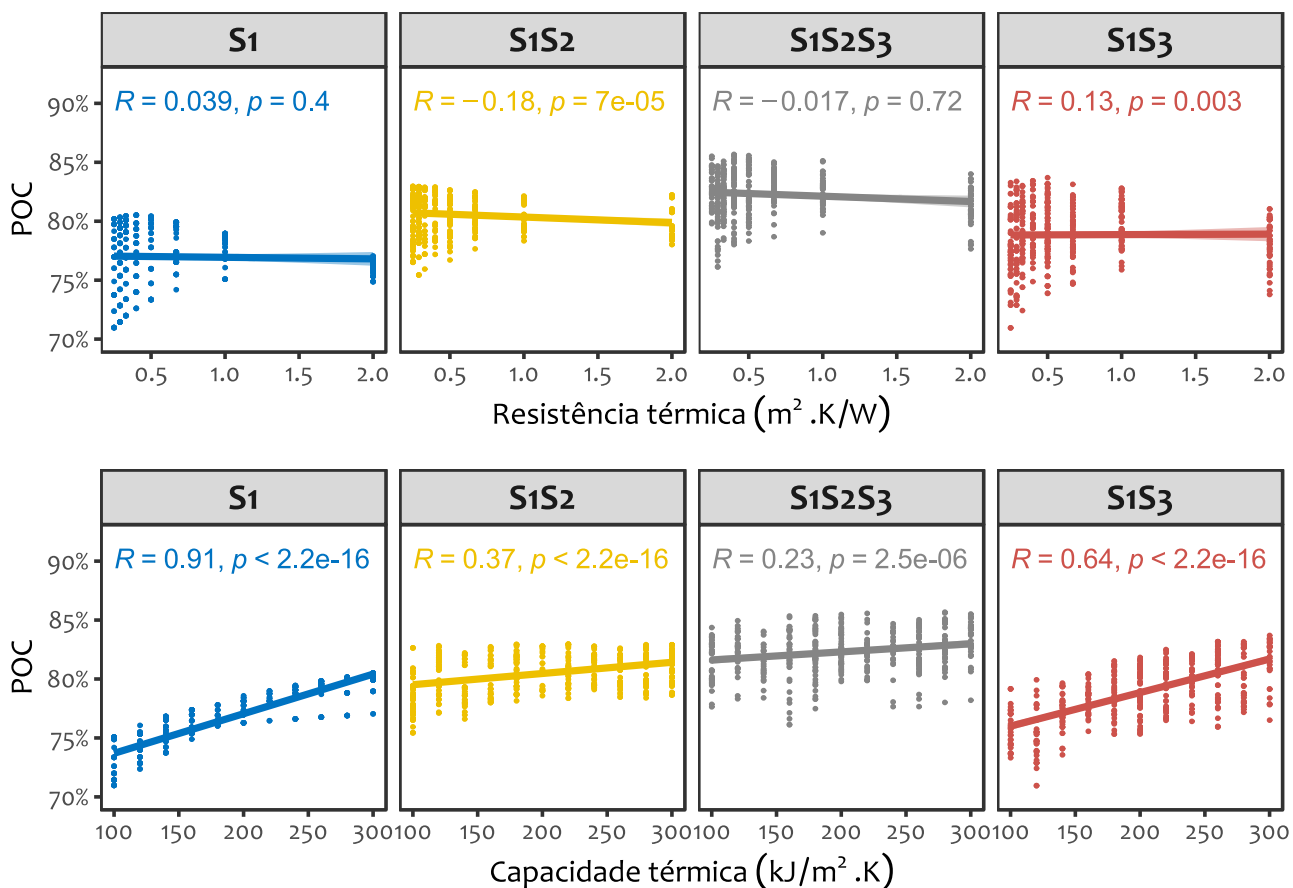
Fonte: O autor

A hipótese nula não pode ser rejeitada para o caso de vazão volumétrica do ar de entrada do EAHE, assim como para a resistência térmica da parede. Para todos os outros parâmetros a hipótese nula é rejeitada. Para a correlação, o comprimento da tubulação EAHE e as temperaturas de mudança de fase apresentam uma moderada força. Apresenta uma fraca correlação a capacidade térmica das paredes e a capacidade térmica latente do PCM. Já a resistência térmica da parede e a vazão volumétrica do EAHE possuem uma correlação nula com a variação do percentual de horas ocupadas em conforto. Para as seções seguintes, os parâmetros serão analisados mais minuciosamente, porém preliminarmente pode se notar que o aumento do comprimento da tubulação gera um significativo aumento das horas em conforto, assim como com a temperatura de mudança de fase, porém com uma distribuição mais oscilatória.

Análise de sensibilidade – parâmetros físicos da parede

A Figura 37 apresenta o gráfico de dispersão dos parâmetros físicos da parede, seccionado por modo de estratégia passiva que envolva o uso desse elemento. A hipótese nula considerada é a de que os parâmetros relacionados com as estratégias não influenciam nos níveis de conforto térmico da sala de aula.

Figura 37 – Análise de sensibilidade para os parâmetros físicos da parede



Fonte: O autor

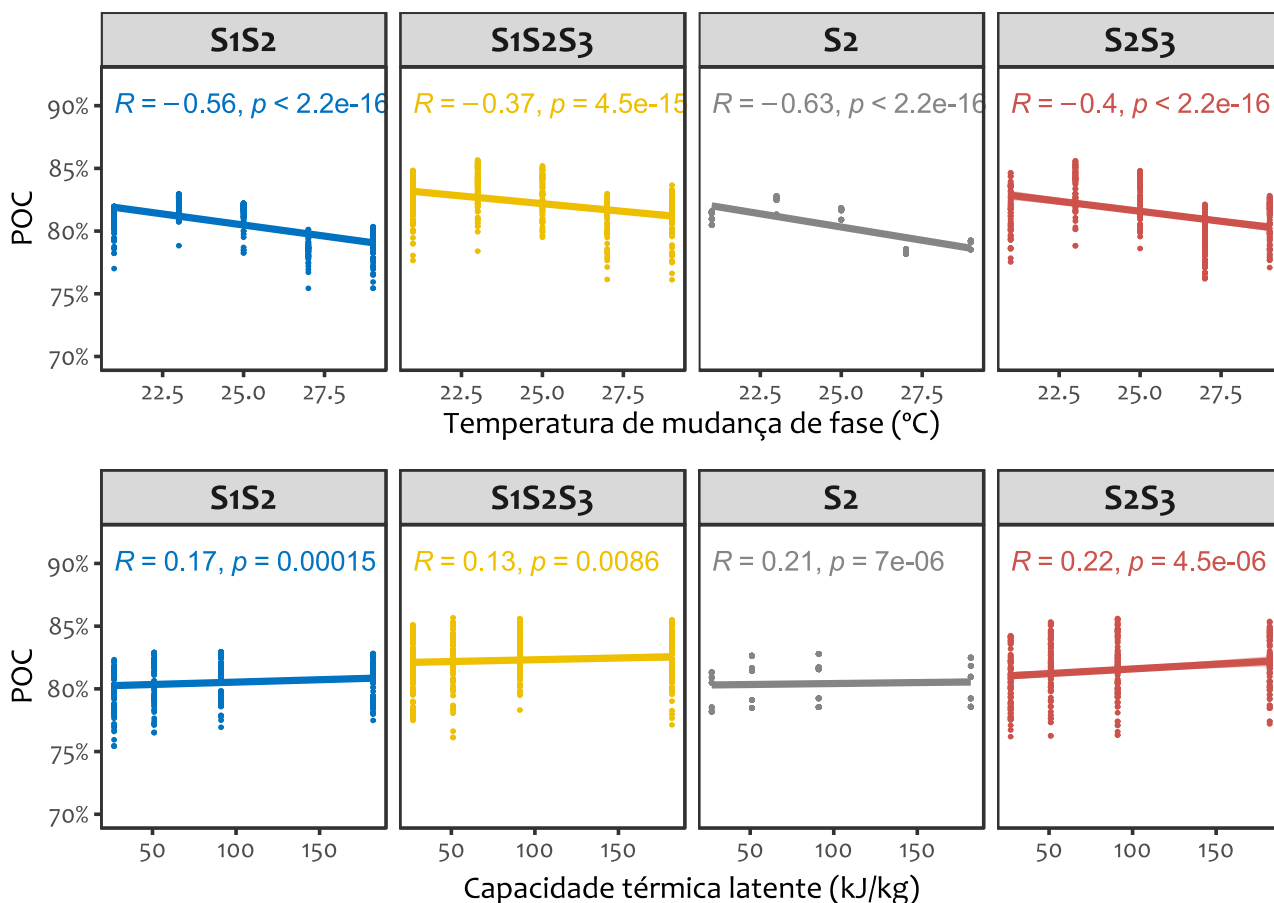
Para o parâmetro de resistência térmica da parede, a hipótese nula deve ser rejeitada para quando se combina a estratégia de PCM e EAHE, respectivamente, o qual possuem uma correlação de nível fraco. Porém a hipótese nula é aceita para as três estratégias combinadas em um mesmo modelo, assim como quando a estratégia é analisada isoladamente. O coeficiente de inclinação da resistência térmica variou com o uso de diferentes modos de estratégias, não apresentando resultado claro se o aumento de valor afeta negativamente ou positivamente o conforto térmico.

Para o parâmetro de capacidade térmica da parede, a hipótese nula deve ser rejeitada para todos os tipos de modelos, combinados ou isolados, apresentando um valor p extremamente significativo para todos os casos. A força de correlação para a estratégia isolada é forte (0,91), sendo moderado quando se é combinado com o sistema EAHE. Para a combinação com o PCM, a força de correlação é moderada, e quando todas as estratégias são combinadas a força é fraca. Percebe-se que quanto maior o valor de capacidade térmica, maior a porcentagem de horas em conforto, principalmente para os casos da estratégia isolada e combinada com o sistema EAHE.

Análise de sensibilidade – parâmetros físicos do PCM

A Figura 38 apresenta o gráfico de dispersão dos parâmetros físicos do PCM, seccionado por modo de estratégia passiva que envolva o uso desse elemento. A hipótese nula considerada é a de que os parâmetros relacionados com as estratégias não influenciam nos níveis de conforto térmico da sala de aula.

Figura 38 – Análise de sensibilidade para os parâmetros físicos do PCM



Fonte: O autor

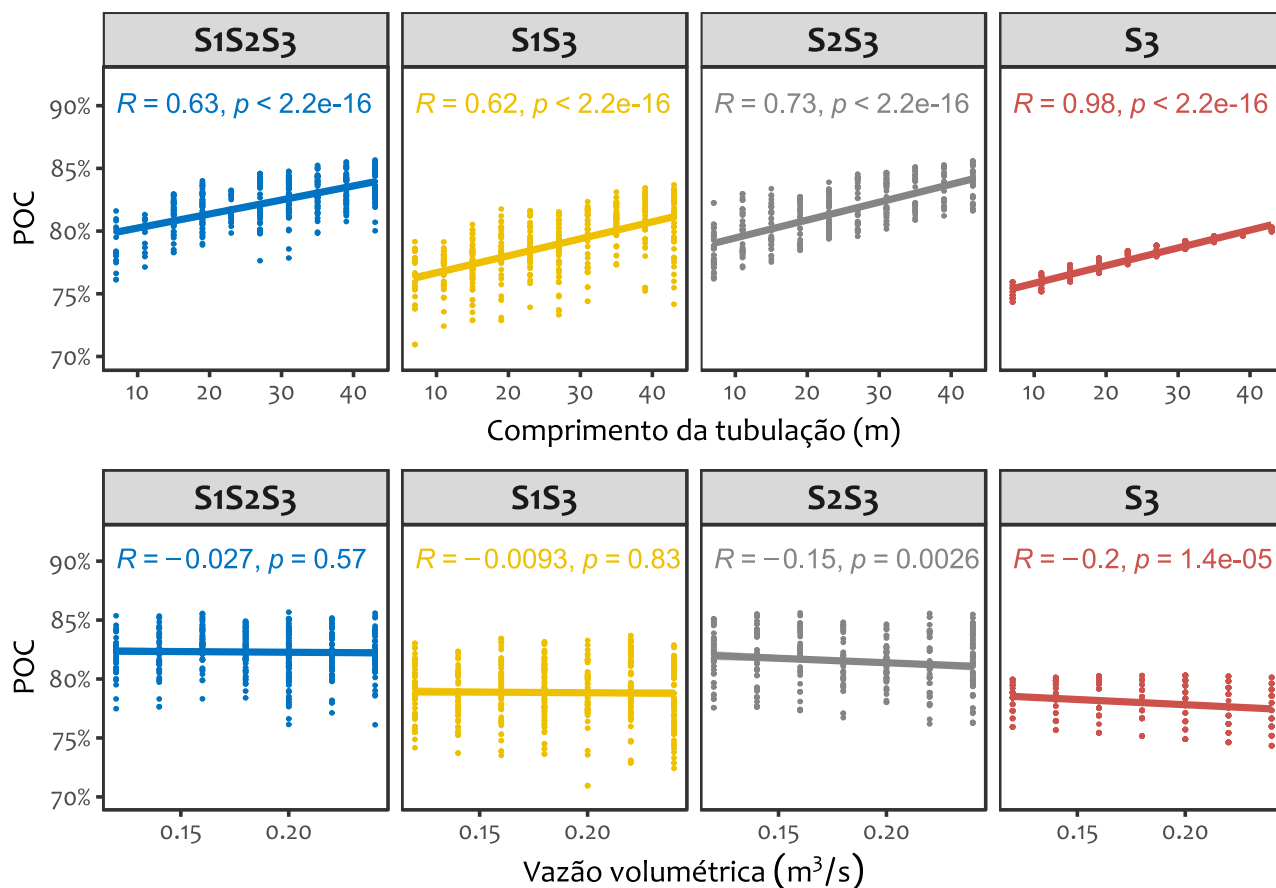
A temperatura de mudança de fase influencia nos percentuais de horas de conforto de forma extremamente significativa ($p < 0,0001$) para todos os modelos, assim rejeitando a hipótese nula. Quando a estratégia é combinada com a seleção de diferentes tipologias de parede, a correlação apresenta-se de nível fraco. Porém, para todos os outros modelos, a força de correlação é moderada. A taxa de variação do POC apresenta-se semelhante para todos os modelos, com seu percentual decrescendo à medida que se utiliza um PCM com temperatura de mudança de fase maior. Porém, nota-se que os materiais com menor temperatura não apresentam os maiores valores de POC.

A variação da capacidade térmica latente é significativa estatisticamente, rejeitando a hipótese nula, para todos os modelos apresentados. Para a correlação, todas as combinações apresentam uma força fraca, assim como para a estratégia isolada. O aumento de seu valor representa um aumento de percentual de horas em conforto, porém sem um grau acentuado, com uma dispersão homogênea quando ser é comparado seus diferentes valores.

Análise de sensibilidade – parâmetros construtivos e operacionais do EAHE

A Figura 39 apresenta o gráfico de dispersão dos parâmetros construtivos e operacionais do EAHE, seccionado por modo de estratégia passiva que envolva o uso desse elemento. A hipótese nula considerada é a de que os parâmetros relacionados com as estratégias não influenciam nos níveis de conforto térmico da sala de aula.

Figura 39 – Análise de sensibilidade para os parâmetros construtivos e operacionais do PCM



Fonte: O autor

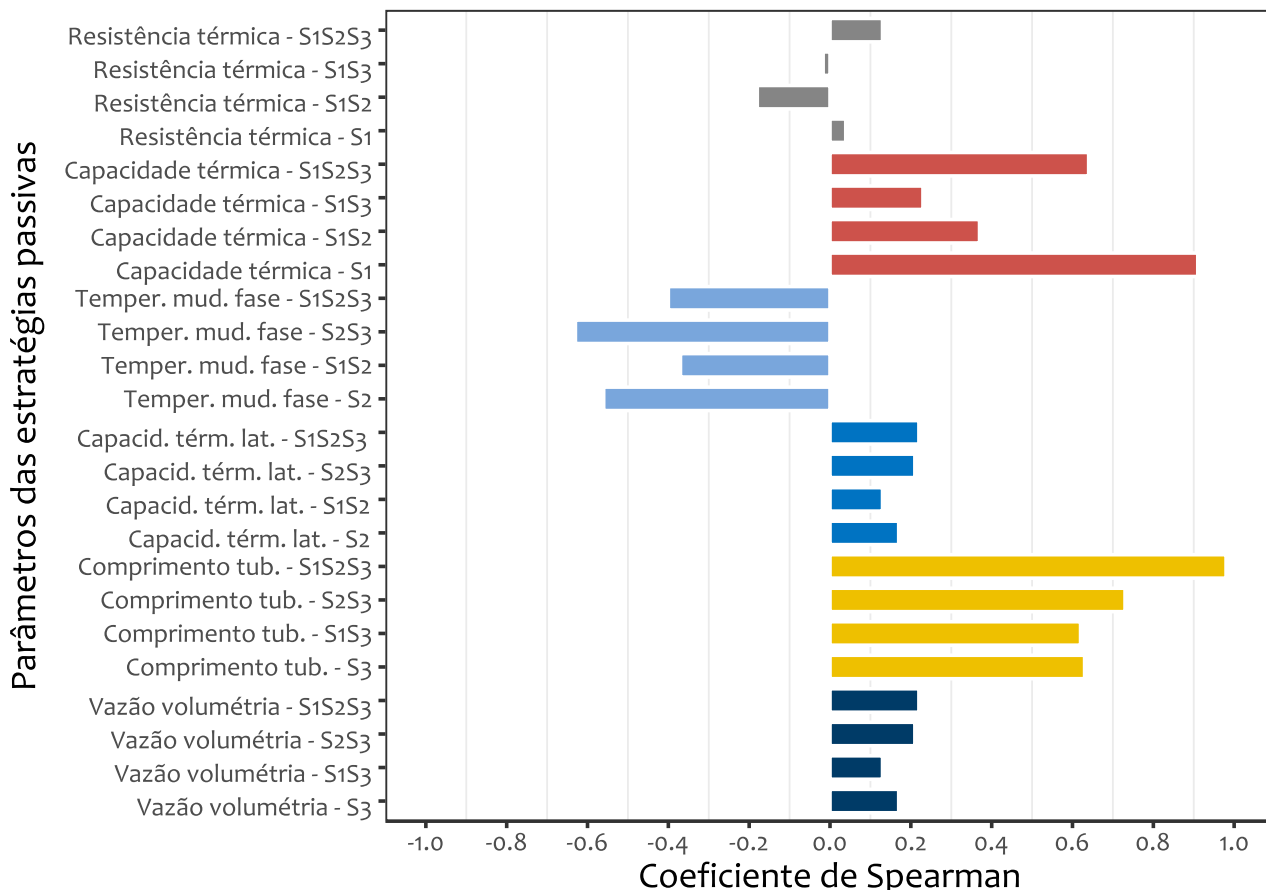
Para os valores de comprimento da tubulação do EAHE, a hipótese nula é rejeitada para todos os modelos, com um valor p extremamente significativo ($p < 0,0001$). Os modelos do EAHE combinados com os parâmetros de parede, assim como com os três elementos combinados, a correlação é considerada como moderada ($R +0.6$), porém para o modelo do EAHE combinado com o PCM e em seu modelo isolado, a correlação é forte, sendo o maior (0,98) quando isolado. O percentual de horas de conforto é acrescido acentuadamente com o aumento gradual do comprimento da tubulação, para todos os modelos, porém com uma dispersão maior quando o EAHE é combinado com a variação de tipologia da parede (S1S3).

O parâmetro de vazão volumétrica do sistema EAHE não apresenta influência significativa sobre o POC para os modelos com os três elementos combinados, também quando combinado com a variação de parâmetros da parede, assim aceitando a hipótese nula. Já para os casos combinado com o PCM e com o EAHE isolado, pode-se rejeitar a hipótese nula, sendo que os dois casos possuem fraca correlação com o POC. O aumento de vazão volumétrica relaciona-se levemente com a diminuição do POC.

Análise de sensibilidade – resumo dos resultados

A Figura 40 apresenta, por meio de um gráfico de barras horizontais emparelhadas, os valores de correlação (coeficiente de Spearman – valor R) dos parâmetros das estratégias passivas apresentadas nos gráficos anteriores, para melhor comparabilidade e visualização. As cores dividem os coeficientes por parâmetros de estratégia, subdivida por modelo de simulação.

Figura 40 – Resumo dos coeficientes de Spearman dos parâmetros das estratégias



Fonte: O autor

O parâmetro que obteve maior força de correlação em geral foi o comprimento da tubulação do EAHE, seguido pela temperatura de mudança de fase do PCM e pela capacidade térmica das paredes, assim cada estratégia passiva possui ao menos um parâmetro que possui boa correlação com o POC. Os outros parâmetros obtiveram uma fraca correlação em geral. A Tabela 16 indica essas forças por parâmetro.

Tabela 16. Quadro das forças de correlação dos parâmetros das estratégias

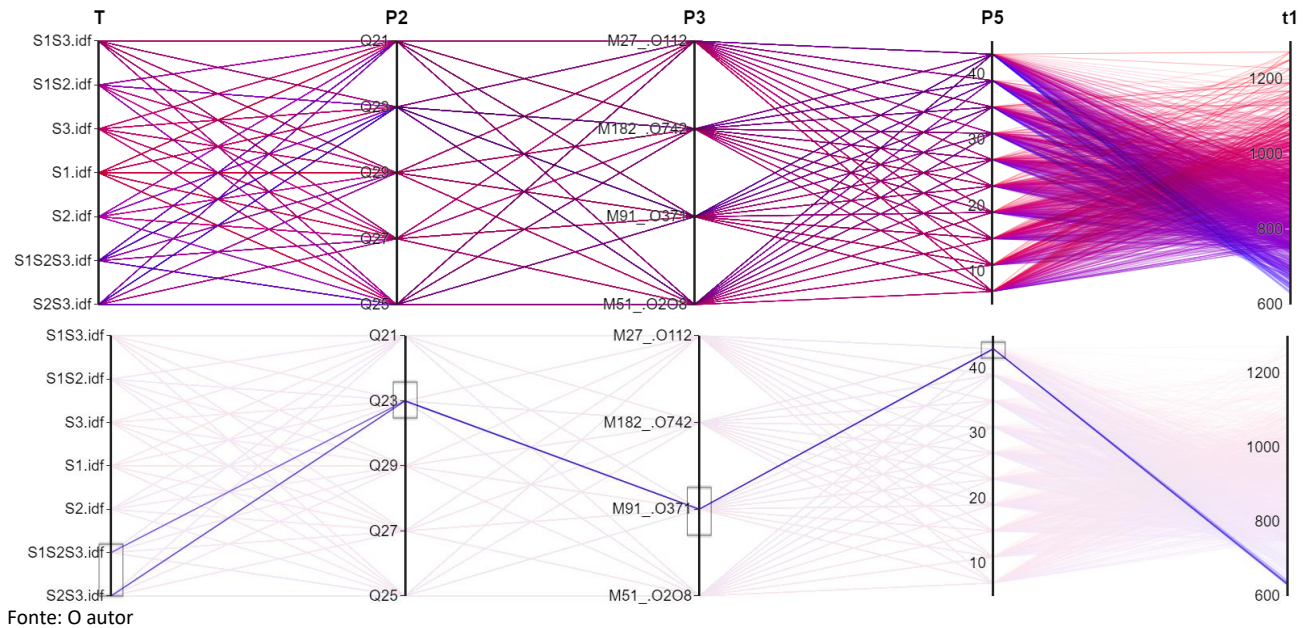
Força de correlação		Parede		PCM		EAHE	
		r. térm	c. térm	t. m. fase.	c. térm. l.	comp.	vaz.
nula							
fraca							
moderada							
forte							

Fonte: O autor

4.4 Análise dos melhores resultados

Um gráfico de coordenadas paralelas, por meio do jEPlus+EA, foi produzido avaliando os atributos de parâmetros considerados mais convenientes para uma otimização. Cada parâmetro do gráfico é representado por uma linha vertical, distribuindo seus atributos ao longo da linha. Os atributos de cada parâmetro podem ser filtrados, restando apenas os casos que utilizaram tais valores. Os resultados desses casos filtrados são confrontados com os dados gerais para se verificar a presença desses casos nos melhores resultados de simulação. As análises dessa seção são apoiadas pelo Apêndice C – Densidade dos parâmetros para os melhores casos.

Figura 41 – Filtragem dos parâmetros de estratégias por meio de coordenadas paralelas



Fonte: O autor

Primeiramente, para a composição da Figura 41, verificou-se que os modelos que possuem maiores valores de POC são os de estratégias combinadas S2S3 e S1S2S3 (T), assim selecionando essas duas opções como primeira filtragem. Em seguida, os parâmetros de parede foram omitidos, pois, para o modelo S1S2S3, o valor de correlação é fraco e sem um valor de destaque para a capacidade térmica (P1) e a influência da resistência térmica (Po) do modelo é considerada insignificante. Para a estratégia PCM, a temperatura de mudança de fase (P2) foi filtrada para 23°C, por ser um valor de destaque verificado, assim como o valor 91 kJ/kg para a capacidade térmica latente (P3). No caso do EAHE, sua vazão foi omitida por possuir fraca correlação e sem um valor proeminente para os melhores resultados, porém para o comprimento (P5) o valor de 43 metros foi selecionado por obter maior densidade nos resultados, principalmente.

Com essa filtragem, o gráfico retornou 7 casos de simulação, sendo que todos se encontram nas 10 melhores simulações de todas as 3200 realizadas, mesmo utilizando apenas 3 parâmetros para 2 modelos de estratégias. Isso representa que a filtragem otimiza a busca de melhores resultados eficazmente. A Tabela 17 apresenta os parâmetros da simulação com maior POC que pertencem ao melhor caso obtido.

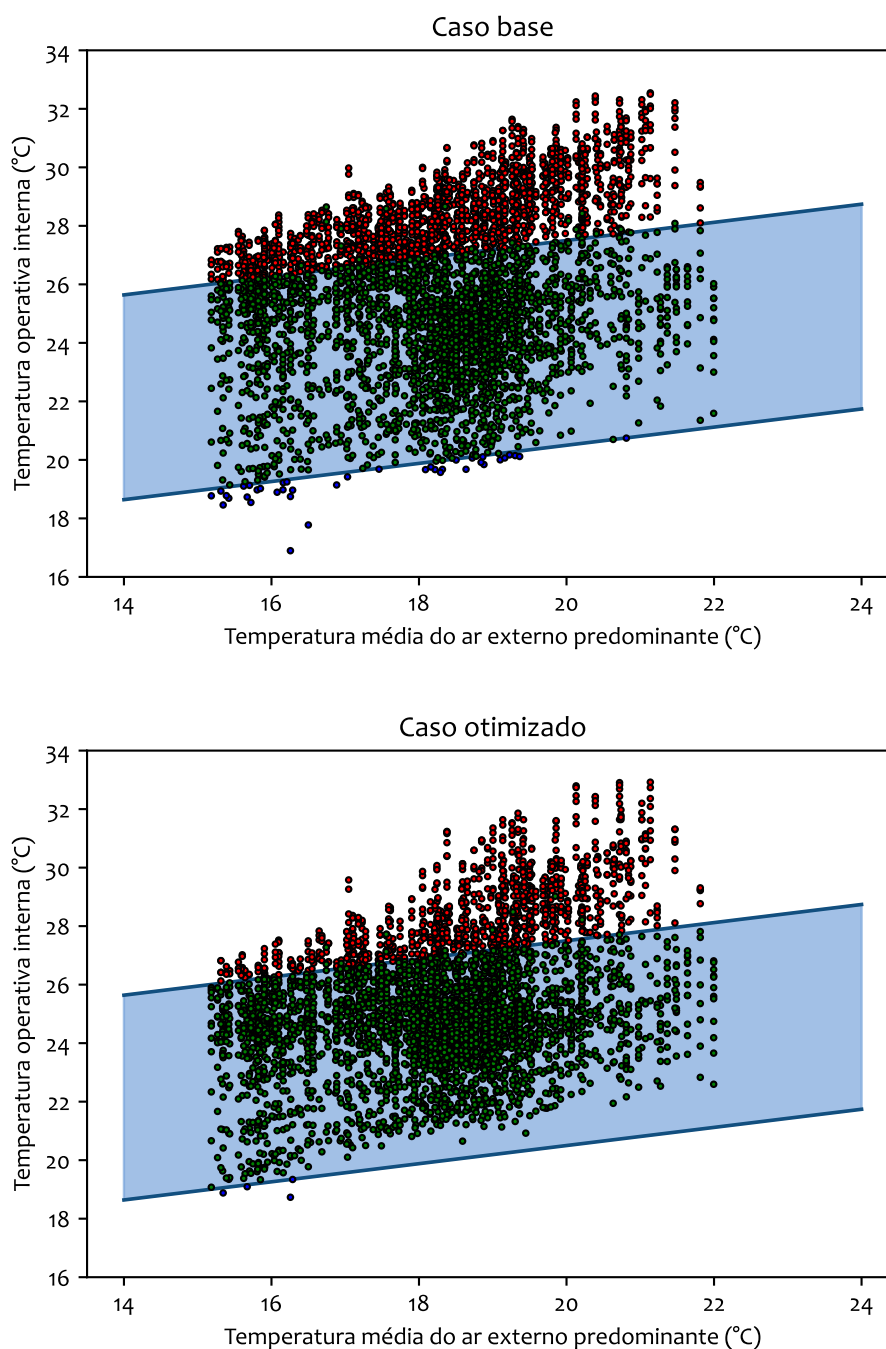
Tabela 17. Parâmetros de estratégia que geram o 5maior valor de POC para as simulações realizadas

	Po	P1	P2	P3	P4	P5	POC
S1S2S3	0,4	280	23	91	0,2	43	85,67%

Fonte: O autor

Assim, comparando os resultados de percentual de horas ocupadas em conforto, obteve-se para o caso otimizado um POC de 85,67%, enquanto para o caso base, com ventilação natural sem chaminé solar, um POC de 72,53%. A Figura 42 apresenta essa comparação por meio de um gráfico com as horas ocupadas em desconforto, com pontos em vermelho para calor e em azul para frio, e pontos em verde para as horas em conforto (dentro da faixa de aceitabilidade de 80% do modelo adaptativo) Percebe-se que o caso otimizado diminui tanto as horas em desconforto para quente quanto as para frio, sendo que para o quente pode-se observar uma queda mais acentuada de pontos vermelhos quando as temperaturas médias do ar externo predominante se encontram entre 15°C e 18°C.

Figura 42 – Comparação de resultados de horas de conforto adaptativo para os casos base e otimizado



Fonte: O autor

4.5 Discussão de resultados

O uso de chaminé solar como solução para ventilação melhora tanto o percentual de horas ocupadas em conforto quanto as renovações de ar por hora (média anual), em comparação do modelo sem o seu uso, reduzindo o número de horas em desconforto em 15,67%. Essa melhora de conforto pode se dar por uma maior velocidade de entrada do ar pela abertura, fator que influencia positivamente a faixa de conforto pelo método adaptativo da ASHRAE 55. O uso da chaminé solar também apresenta taxas de ventilação mais estáveis, que também contribuem para um maior número de horas em conforto (TAN; WONG, 2014).

A modelagem da chaminé solar apresentou certas limitações em sua modelagem no *EnergyPlus*, pois torna-se demasiadamente complexa quando necessário sua integração com um EAHE no software, o que impediu sua inserção nas simulações paramétricas. Outra limitação é a falta de conexão entre as diferenças de pressão geradas pela chaminé solar no ambiente e no EAHE, sendo que o módulo *EarthTube* não comporta tal análise. Assim, não se pôde inserir a chaminé solar nas análises estatísticas realizadas, assim não podendo verificar sua influência com seus parâmetros combinado com outras estratégias de climatização

Para as análises de incerteza, as estratégias isoladas apresentam um perfil de densidade deslocado para menores valores de POC, comparado ao caso geral (Figura 34). Já os modelos com duas estratégias combinadas apresentam um perfil de densidade precisamente sobreposto com o caso geral, sendo importante notar que o perfil de densidade de estratégias isoladas é muito parecido com o de duas estratégias combinadas, porém com o pico de densidade deslocado. Tal característica não ocorre para o uso de três estratégias combinadas, que possui um perfil de densidade diferente do caso geral, com maiores valores de POC, o que pode significar um melhor desempenho para o aumento de horas de conforto quando utilizado um maior número de estratégias passivas de climatização combinadas, o que está de acordo com os resultados de Alemu (2013).

Além disso, o uso de três estratégias combinadas aumenta a estabilidade da variação de valores, com um desvio padrão (1,84%) menor do que para os outros modelos, isolado e duas estratégias combinadas (2,43% e 2,26%). Também é apresentado um distanciamento do valor mínimo para seus resultados (76,12%) dos outros modelos (70,98% e 70,95%). Tal desempenho pode ser explicado pelo fato de o modelo com três estratégias combinadas conter PCM para todas as suas simulações, enquanto os outros modelos contêm situações sem o uso de PCM, que deslocando os resultados de POC para valores inferiores, como mostra a Figura 35.

Após o seccionamento dos modelos, para as estratégias isoladas S1 (parede), S2 (PCM) e S3 (EAHE), percebe-se o destaque dos valores de POC de S2 em relação as outras estratégias S1 e S3, porém a solução S3 possui limitações construtivas impostas no seu dimensionamento, o que pode explicar esse desempenho inferior. Além disso, é importante pontuar que, enquanto S1 avalia várias tipologias de paredes, S2 e S3 utilizam a mesma topologia, que é a do caso base (valor-R de 0,43 m²K/W e capacidade térmica de 161 kJ/ m²K),

Tal particularidade também explica o fato de o PCM obter melhores resultado de POC do que o EAHE para o caso isolado. O PCM obtém bons resultados para materiais com as mesmas características que o de base possui – baixo valor-R e médio valor de capacidade térmica (Figura 53) – para o contexto analisado, além desses parâmetros serem de fraca correlação com o POC. Já o EAHE se comporta melhor para altos valores de capacidade térmica, que possui alta correlação com o POC para o caso. Esse

entendimento também pode ser verificado na Figura 35, para os valores máximo de POC de soluções com duas estratégias combinadas, S1S2 e S1S3.

Assim, para as estratégias combinadas S1S2 e S1S3, a seleção de tipologia construtiva da parede afeta consideravelmente nos valores máximos de POC alcançados, sendo que, para o caso otimizado com essas estratégias, o modelo com o uso de EAHE produz maior POC que com o uso de PCM. Porém, para os casos de melhores resultados, verifica-se que os parâmetros de parede para o caso de PCM, comparado ao EAHE, se encontram em diferente extensão para a capacidade térmica, com o PCM em torno de 200 kJ/m²K e o EAHE em torno de 280 kJ/m²K (alcançado com tipologias de parede menos convencionais). Já para os valores-R, ambos possuem a mesma extensão para os casos otimizados. A Figura 53 auxilia essa visualização.

Tal dificuldade do EAHE (altos valores de capacidade térmica da parede) para alcançar seu resultado ótimo é superado por meio de sua combinação com a estratégia PCM. Quando essas duas estratégias são integradas, os parâmetros de capacidade térmica da parede passam a ter fraca correlação com o resultado (Figura 37), e a dependência entre valor-R e POC não é significativa. Essa mudança de comportamento da capacidade térmica deve-se a substituição do papel de massa térmica da parede para o PCM (RICHARDSON; WOODS, 2008). Assim, pode-se selecionar o material mais conveniente para a composição de parede, quando utilizado a combinação EAHE e PCM no mesmo sistema.

Após o teste de Tukey (Tabela 15), avalia-se que a diferença entre S1 e S3, S2 e S1S2, S2 e S2S3 não são estatisticamente significativos. Para o primeiro caso, o uso de outra tipologia de parede pode modificar o seu resultado, algo observado entre S1 e S1S3, o qual a diferença é significativa. Para os outros casos que não são significativos, é interessante perceber que a maioria dos casos ocorreu na comparação entre S2 e outras soluções, o que pode ser explicado pela diferença de tamanho de amostra, onde S2 possui menor número que os outros, assim gerando uma análise mais conservadora, segundo o método de Tukey-Kramer (HAYTER, 1984).

Os parâmetros das estratégias que mais influenciaram no POC da sala de aula foram o comprimento da tubulação do EAHE e a temperatura de mudança de fase. O comprimento da tubulação está diretamente envolvido com a configuração traduzida da configuração em paralelo confirmando que a configuração com tubulação das calhas verticais no valor de 0,05 centímetros são os mais efetivos. Para a temperatura de mudança de fase, o material com 23°C obteve grande destaque para os melhores casos, resultado este diferente do analisado por Brito *et al.* (2017), porém a autora avaliou a redução de temperatura máxima e não o conforto térmico.

A capacidade térmica da parede obteve uma forte correlação para os modelos sem o PCM, porém esse parâmetro da parede perde força pela integração com o PCM. Com as duas estratégias combinadas, percebe-se que a capacidade térmica da parede e a latente para o PCM apenas possui resultados inferior para baixos valores. Com isso, os resultados se estabilizam para acima de 51 kJ/kg no caso de capacidade térmica latente, e para acima de 180 kJ/m².K, sem perceptível aumento de POC a partir desses valores.

Os parâmetros que não obtiveram destaque na influência de resultados foram a resistência térmica da parede e a vazão volumétrica do EAHE. Normalmente, o valor-R é um parâmetro importantes para o conforto térmico da edificação, porém para o contexto analisada, principalmente com a combinação de duas ou mais estratégias, a resistência térmica perde sua força de correlação e significância com o POC. Porém, percebe-se que os valores de POC são reduzidos para parede com um alto isolamento térmico, para qualquer modo de estratégia (Figura 37).

Para a vazão volumétrica, sua variação de valores não foi significativa para o POC, nem para a otimização dos resultados. Enquanto a diminuição de vazão gera uma troca de calor mais efetiva, o seu aumento retira mais calor do ambiente (BISONIYA, Trilok Singh; KUMAR; BARENDAR, 2013), porém tal relação não impacta no POC para o presente contexto. Porém é importante pontuar que essa análise de vazão volumétrica está relacionada a simulação com o módulo *EarthTube*, que modela uma tubulação singular, assim dificultando na tradução dessa característica para a tubulação paralela, sendo um limitante de pesquisa.

A análise de resultados e modelos de estratégias combinadas se mostrou importante para a filtragem de resultados, pois selecionando um pequeno número de atributos pôde-se encontrar os melhores resultados de POC. Porém quando se analisa a variação de atributos dos parâmetros não selecionados para a filtragem, verifica-se uma baixa extensão de valores. Isso se deve ao tamanho de amostragem e de seu método de seleção aleatório (hipercubo latino), que é conveniente para as análises estatísticas, porém, para ser mais preciso na obtenção do caso otimizado, poderia ser realizada uma concentração de simulações nos atributos filtrados.

O caso otimizado, integrando os melhores parâmetros construtivos e operacionais das estratégias passivas combinadas, obteve um aumento de POC importante quando comparado ao caso base, sem chaminé solar. Mesmo com o projeto que serviu como base possuindo diversos elementos construtivos para o conforto térmico, a inserção das estratégias passivas propostas nesta pesquisa conseguiu aumentar o POC consideravelmente, reduzindo o número de horas de desconforto em mais de 47% (de 1203 para 627 horas).

5 Conclusão

A busca por ambientes escolares mais confortáveis termicamente é o motivador para a realização desta pesquisa. Para isso, é proposto o uso de estratégias passivas de climatização que possibilitam o ajuste térmico do ambiente. Assim, para buscar a melhor aplicação dessas estratégias, objetiva-se avaliar a influência de estratégias passivas de climatização por dissipação e modulação de calor, isoladas e integradas, no conforto térmico de uma sala de aula inserida no contexto climático de Brasília.

Para alcançar esse objetivo, a metodologia proposta envolveu o uso de modelagem e simulação computacional, superando as limitações de cada software utilizado, por meio do uso combinado de diversas ferramentas. Com isso, possibilita-se a realização de uma análise paramétrica com mais de 3200 simulação de uma edificação com diversos modos de combinação de estratégias passivas. Os resultados foram capazes de realizar análises estatísticas de sensibilidade e incertezas com baixo erro de tipo I e tipo II.

As análises estatísticas foram apropriadas para determinar as diferenças de resultados entre estratégias isoladas, de duas combinações e três combinações, permitindo a comparação de médias e outros dados descritivos. As análises também foram capazes de avaliar cada modo de combinação das estratégias, além de seus parâmetros, determinando suas forças de correlação e significância estatística com o conforto térmico, possibilitando uma filtragem de parâmetros para uma otimização analítica.

Sobre as estratégias passivas, a chaminé solar possuiu algumas limitações de implementação na ferramenta computacional, porém sua análise individual, fora das simulações paramétricas, foi possível, resultando na avaliação da influência de seu comprimento e na sua comparação com um modelo base que se utiliza de ventilação cruzada por janelas. Assim, o uso do maior comprimento de chaminé reduz o número de horas de desconforto em 15,67%, quando comparado ao modelo base.

Pelo teste de Tukey, a maior parte das estratégias passivas possuem diferença significativas entre si, sendo que o POC das três estratégias combinadas é significativamente maior do que todas os outros modos de combinação. Além disso, o uso de três estratégias combinadas aumenta a estabilidade da variação de valores, com um desvio padrão (1,84%) menor do que para os outros modelos, isolado e duas estratégias combinadas (2,43% e 2,26%). Também é apresentado um distanciamento do valor mínimo para seus resultados (76,12%) dos outros modelos (70,98% e 70,95%).

Para os parâmetros construtivos das estratégias, o comprimento da tubulação de EAHE e a temperatura de mudança de fase do PCM foram os parâmetros que mais contribuíram para a diminuição de POC da sala de aula. Naturalmente, o maior comprimento de tubulação gera o melhor desempenho, e para a temperatura de mudança de fase o melhor valor é 23°C, isso para o contexto analisado. Os outros parâmetros apresentaram baixa contribuição para a melhora de conforto, porém fornecendo dados para a exclusão de valores que prejudicam o conforto do ambiente.

A filtragem de valores, mesmo não analisando toda a extensão de atributos dos parâmetros selecionados, pôde retornar o caso otimizado, de maior POC, das 3200 simulações realizadas. O caso que utiliza a combinação das três estratégias passivas de climatização (tipologia de parede ótima, PCM e EAHE) retornou um POC de 85,67%, enquanto o caso base, sem chaminé solar, retornou um POC de 72,53%. Isso significa que, com o uso das estratégias passivas propostas, as horas em desconforto da sala de aula pode ser reduzido em mais de 47%.

5.1 Contribuições da pesquisa

Os procedimentos propostos para avaliar a influência de estratégias passivas de climatização no conforto térmico alcançou seus objetivos, resultando na significância estatística entre essas variáveis para diversos modos de combinação, a atuação e forças de correlação de seus parâmetros nos resultados e obtenção da melhoria de conforto para o caso com as estratégias passivas configuradas de forma otimizada.

O trabalho contribui no desenvolvimento de uma metodologia para analisar a influência de parâmetros construtivos e operacionais de edificações em relação a uma variável dependente, por meio de análises paramétricas e estatísticas. Também como produto, o trabalho desenvolveu linhas de código para simulação de EAHE com tubulação em paralelo, método para modelagem de chaminé solar junto com EAHE no software *EnergyPlus*, e diretrizes para uso do software *JEPlus+EA*, essencial para parametria.

Além disso, o presente trabalho apresentou parâmetros importantes das estratégias passivas para sua execução no contexto climático de Brasília, como a temperatura de mudança de fase ótima para PCM, tipologia construtiva de paredes, e capacidade de resfriamento de ar de um sistema EAHE com configurações construtivas viáveis para um projeto de edificação de médio porte, como uma escola.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento da proposta desse trabalho pode ser aprofundado com as seguintes sugestões:

- Realizar testes estatísticos de análise de sensibilidade global, como método Sobol e Morris, para aumentar sua precisão;
- Inserir estratégias passivas no *EnergyPlus* através do *Python Energy Management System*;
- Avaliar outros contextos climáticos, ou mesmo zonas bioclimáticas brasileiras;
- Desenvolver uma biblioteca de estratégias passivas de climatização, pela modelagem matemática e sua tradução para código computacional.
- Analisar a relação entre as estratégias passivas de modulação e dissipação de calor, junto com estratégias de prevenção de calor;
- Desenvolver método para a análise de EAHE com chaminé solar, dentro do *EnergyPlus*, porém com o fator de pressão;
- Propor método simplificado para a problemática de otimização de parâmetros construtivos e operacionais de diferentes estratégias passivas;
- Avaliar outras variáveis dependentes, como custo ciclo de vida (LCC), prazo do retorno de investimento (PRI), energia e carbono incorporado.

Referências

- ABBASPOUR-FARD, M. H.; GHOLAMI, A.; KHOJASTEHPOUR, M. Evaluation of an earth-to-air heat exchanger for the north-east of Iran with semi-arid climate. **International Journal of Green Energy**, vol. 8, no. 4, p. 499–510, 2011. <https://doi.org/10.1080/15435075.2011.576289>.
- ABHIRAG, V. G. S. A review on performance enhancement of earth air heat exchanger. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, vol. 42, no. 5, p. 83–88, 2019. <https://doi.org/10.26480/jmerd.05.2019.83.88>.
- ABNT. **NBR 15575-1 2013 Edificações Habitacionais - Desempenho parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- ABNT. **NBR 16401-3:2008 Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior**. Rio de Janeiro, RJ, 2008. Available at: http://www.ductbusters.com.br/normas/NBR_16401-3_2008.pdf.
- ABOULNAGA, M. M.; ABDRABOH, S. N. Improving night ventilation into low-rise buildings in hot-arid climates exploring a combined wall-roof solar chimney. **Renewable Energy**, vol. 19, no. 1–2, p. 47–54, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00014-2).
- ABRO, R. S. RECOGNITION OF PASSIVE COOLING TECHNIQUES. **Renewable Energy**, vol. 5, no. Part II, p. 1143–1146, 1994. .
- AFONSO, C.; OLIVEIRA, A. Solar chimneys: Simulation and experiment. **Energy and Buildings**, vol. 32, no. 1, p. 71–79, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00038-9).
- AFRAND, M.; SHAHSAVAR, A.; SARDARI, P. T.; SOPIAN, K.; SALEHIPOUR, H. Energy and exergy analysis of two novel hybrid solar photovoltaic geothermal energy systems incorporating a building integrated photovoltaic thermal system and an earth air heat exchanger system. **Solar Energy**, vol. 188, p. 83–95, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.080>.
- AGHAEI CHADEGANI, A.; SALEHI, H.; MD YUNUS, M. M.; FARHADI, H.; FOOLADI, M.; FARHADI, M.; ALE EBRAHIM, N. A comparison between two main academic literature collections: Web of science and scopus databases. **Asian Social Science**, vol. 9, no. 5, p. 18–26, 2013. <https://doi.org/10.5539/ass.v9n5p18>.
- AGRAWAL, K. K.; MISRA, R.; AGRAWAL, G. D.; BHARDWAJ, M.; JAMUWA, D. K. The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. **Geothermics**, vol. 82, p. 34–50, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.011>.
- AKEIBER, H.; NEJAT, P.; MAJID, M. Z. A.; WAHID, M. A.; JOMEHZADEH, F.; ZEYNALI FAMILI, I.; CALAUTIT, J. K.; HUGHES, B. R.; ZAKI, S. A. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 60, p. 1470–1497, 2016. DOI 10.1016/j.rser.2016.03.036. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>.
- AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. **Turkish Journal of Emergency Medicine**, vol. 18, no. 3, p. 91–93, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001>.
- AL-KAYIEM, H. H.; K.V., S.; GILANI, S. I. U.-H. Mathematical analysis of the influence of the chimney height and collector area on the performance of a roof top solar chimney. **Energy and Buildings**, vol. 68, no. PARTA, p. 305–311, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.021>.
- ALDAWOUD, A. Windows design for maximum cross-ventilation in buildings. **Advances in Building Energy Research**, vol. 11, no. 1, p. 67–86, 2017. <https://doi.org/10.1080/17512549.2016.1138140>.
- ALEMU, A.T.; SAMAN, W.; BELUSKO, M. A coupled building ventilation and thermal model incorporating passive airflow components. 2011. **Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association [...]**. 2011. p. 86–93.

ALEMU, Alemu Tiruneh. Integration of passive elements into ventilation and air - conditioning of buildings. no. July, p. 229, 2013. .

ANSI/ASHRAE. **Standard 55-2010 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA. USA, 2010.

ARANDA-USÓN, A.; FERREIRA, G.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M.; MAINAR-TOLEDO, M. D.; ZABALZA BRIBIÁN, I. Phase change material applications in buildings: An environmental assessment for some Spanish climate severities. **Science of the Total Environment**, vol. 444, p. 16–25, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.012>.

ASCIONE, F.; BELLIA, L.; MINICHELLO, F. Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. **Renewable Energy**, vol. 36, no. 8, p. 2177–2188, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.013>.

ASHRAE. **2017, ASHRAE fundamental handbook SI**. 2017.

ATLAS, G. S. Radiação Global Horizontal. 2019. **Solargis**. Available at: <https://globalsolaratlas.info/download/world>. Accessed on: 26 Sep. 2020.

BADAWIYEH, M.; GHADDAR, N.; GHALI, K. Case Study of Trombe Wall Inducing Natural Ventilation through Cooled Basement Air to Meet Space Cooling Needs. **Journal of Energy Engineering**, vol. 143, no. 2, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000393).

BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, vol. 42, no. 9, p. 1361–1368, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>.

BANSAL, V.; MISHRA, R.; AGARWAL, G. D.; MATHUR, J. Performance analysis of integrated earth-air-tunnel- evaporative cooling system in hot and dry climate. **Energy and Buildings**, vol. 47, p. 525–532, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.024>.

BASSIOUNY, R.; KOURA, N. S. A. An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation. **Energy and Buildings**, vol. 40, no. 5, p. 865–873, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.005>.

BENHAMMOU, M.; DRAOUI, B.; ZERROUKI, M.; MARIF, Y. Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. **Energy Conversion and Management**, vol. 91, p. 1–11, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.042>.

BENRACHI, N.; SMAILI, A.; LAMARCHE, L.; OUZZANE, M. Numerical Analysis of a New Configuration of Ground-Air Heat Exchanger. 2018. **Proceedings of 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2017 [...]**. 2018. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477368>.

BHAVSAR, M. Multidisciplinary research: pros and cons. 2017. **NatureJobs Blog**. Available at: <http://blogs.nature.com/naturejobs/2017/09/11/multidisciplinary-research-pros-and-cons/>. Accessed on: 2 Oct. 2020.

BIMAGANBETOVA, M.; MEMON, S. A.; SHERIYEV, A. Performance evaluation of phase change materials suitable for cities representing the whole tropical savanna climate region. **Renewable Energy**, no. xxxx, 2019. DOI 10.1016/j.renene.2019.10.046. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.046>.

BISONIYA, T.S.; KUMAR, A.; BARENDAR, P. Energy metrics of earth-air heat exchanger system for hot and dry climatic conditions of India. **Energy and Buildings**, vol. 86, p. 214–221, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.012>.

BISONIYA, T.S.; KUMAR, A.; BARENDAR, P. Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger (EAHE) systems in India: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 19, p. 238–246, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.023>.

BISONIYA, Trilok Singh; KUMAR, A.; BARENDAR, P. Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger (EAHE) systems in India: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 19, p. 238–246, 2013. DOI 10.1016/j.rser.2012.11.023. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.023>.

- BISWAS, K.; LU, J.; SOROUSHIAN, P.; SHRESTHA, S. Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard. **Applied Energy**, vol. 131, p. 517–529, 2014. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.02.047. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.047>.
- BOMBERG, M.; FURTAK, M.; YARBROUGH, D.; DECHNIK, M. Buildings with environmental quality management , part 2 : Integration of hydronic heating / cooling with thermal mass. 2018. <https://doi.org/10.1177/1744259117735465>.
- BORDOLOI, N.; SHARMA, A.; NAUTIYAL, H.; GOEL, V. An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 89, no. March, p. 261–280, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2018.03.056. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>.
- BRITO, A. C. de; AKUTSU, M.; SALLES, E. M.; CASTRO, G. M. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, vol. 17, no. 1, p. 125–145, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100128>.
- BRITTLE, J. P. **Passive system integration for office buildings in hot climates**. 2017. Loughborough University, 2017.
- BRITTLE, J. P.; EFTEKHARI, M. M.; FIRTH, S. F. Combined Passive System Selection Strategy for Low Carbon Commercial Building. 2018. **Zero Carbon Buildings Today and in the Future [...]**. Birmingham, England, UK, 2018. p. 59–66.
- BRUM, F. J. **Uso de Cerâmica em Sensores Térmicos para a Determinação da Difusividade Térmica de Solos em Função do Teor de Umidade**. 2007. 101 f. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2007.
- CENTER, C. E. PNC PLAZA. 2016. **Too Transparent?** Available at: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/the-ornamental-metal-institute-of-new-york/too-transparent/5/>. Accessed on: 26 Sep. 2020.
- CHEN, Z. D.; BANDOPADHAYAY, P.; HALLDORSSON, J.; BYRJALSEN, C.; HEISELBERG, P.; LI, Y. An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. **Building and Environment**, vol. 38, no. 7, p. 893–906, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00057-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00057-X).
- CLARKE, J. **Energy Simulation in Building Design**. 2ª Edição. Oxford, UK: Taylor & Francis, 2001.
- CLIMATIZAÇÃO. Dicionário Online de Português. 2021. .
- CODEPLAN. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília, 1984.
- CODIN, C. de D. de I. **PROPOSTA PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDO TÉCNICO DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DIRETRIZES PARA PROJETOS DE ESCOLAS PADRÃO 5 E 9 SALAS DO FNDE**. Brasília-DF, Brasil, 2016.
- CORGNATI, S. P.; FILIPPI, M.; VIAZZO, S. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort. **Building and Environment**, vol. 42, no. 2, p. 951–959, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.027>.
- COSTA, H. A.; LOGSDON, L.; FABRICIO, M. M. Flexibilidade em projetos de arquitetura: contribuições a partir de uma revisão sistemática da literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, vol. 8, no. 3, p. 144, 2018. <https://doi.org/10.20396/parc.v8i3.8650206>.
- DAI, Y. J.; SUMATHY, K.; WANG, R. Z.; LI, Y. G. Enhancement of natural ventilation in a solar house with a solar chimney and a solid adsorption cooling cavity. **Solar Energy**, vol. 74, no. 1, p. 65–75, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00106-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00106-3).
- DE DEAR, R. J.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Final report for ASHRAE RP-884—Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. Sydney, Australia, 1997.

DESIGNBUILDER. **DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation**. v6 ed. England, UK: DesignBuilder, 2019. Available at: www.designbuilder.co.uk.

DIGIOVANNI, D.; JENG, B.; WAN, A. High performance modular building: Cost effective solutions for design and construction of a sustainable commercial building. 2012. **Structures Congress 2012 - Proceedings of the 2012 Structures Congress [...]**. 2012. p. 953–964. <https://doi.org/10.1061/9780784412367.085>.

DRORI, U.; DUBOVSKY, V.; ZISKIND, G. Experimental verification of induced ventilation. **Journal of Environmental Engineering**, vol. 131, no. 5, p. 820–826, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:5\(820\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:5(820)).

DUBEY, M. K.; BHAGORIA, J. L.; LANJEWAR, L. Earth air heat exchanger in parallel connection. **J. Eng. Trends Technol.**, vol. 4, p. 2463–2467, 2013. .

EL-SAWI, A.; WIFI, A.; YOUNAN, M.; ELSAYED, E.; BASILY, B. Application of folded sheet metal in flat bed solar air collectors. **Appl Therm Eng**, vol. 30, p. 864–871, 2005. .

ELALI, G. A. O ambiente da escola - o ambiente na escola - uma discussao sobre a relação escola-natureza. **Estudos de Psicologia**, vol. 8, no. 2, p. 309–319, 2003. .

ELMINSHAWY, N. A. S.; SIDDIQUI, F. R.; FAROOQ, Q. U.; ADDAS, M. F. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. **Applied Thermal Engineering**, vol. 124, p. 1319–1327, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.119>.

ENERGYPLUS. **Engineering Reference**. Berkeley, IL, 2020.

EREC. **Earth Cooling Tubes**. 2002.

ETHERIDGE, D. W. Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design - Instantaneous flow rates. **Building and Environment**, vol. 35, no. 4, p. 321–337, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00021-9).

FARIA, L. P. **Modelagem Matemática e Avaliação Experimental da Não Uniformidade do Escoamento da Água em coletores Solares Planos**. 2007. 151 f. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2007.

FERREIRA, C. P. **Alguns Dados sobre o Clima para a Edificação em Brasília**. 1965. 103 f. Universidade de Brasília, 1965.

FNDE. Sobre o PAR. 2014. **O que é?** Available at: <https://www.fnde.gov.br/index.php/programas/par/sobre-o-plano-ou-programa/ perguntas-frequentes-2>. Accessed on: 14 Dec. 2021.

FRIESS, W. A.; RAKHSHAN, K. A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 72, p. 485–496, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.026>.

GAN, G. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings. **Energy and Buildings**, vol. 27, no. 1, p. 37–43, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00024-8).

GAO, C. F.; LEE, W. L. Evaluating the influence of openings configuration on natural ventilation performance of residential units in Hong Kong. **Building and Environment**, vol. 46, no. 4, p. 961–969, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.029>.

GIVONI, B. M. **Climate and Architecture**. London, UK: Applied Science Publishers, 1976.

GONZALES, T. S. **PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO DE ALTO DESEMPENHO PARA ADEGA DE CACHAÇA**. 2017. 100 f. Universidade de Brasília, 2017. Available at: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/19861/1/2017_TomazSilvaGonzales_tcc.pdf.

- GONZALES, T. S.; PIMENTA, J. M. D. Projeto De Climatização De Alto Desempenho Para Adega De Cachaça. 2018. **Mercofrio 2018 - 11º Congresso Internacional de Ar-Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação [...]**. Porto Alegre - RS: ASBRAV, 2018. p. 11.
- GOSWAMI, D. Y.; BISELI, K. M. Use of underground air tunnels for heating and cooling agricultural and residential building. **University of Florida**, vol. Fact Sheet, 1993. .
- GOSWAMI, D. Y.; ILESLAMLOU, S. Performance Analysis of a Closed-Loop Climate Control System Using Underground Air Tunnel. **J. Sol. Energy Eng.**, vol. 112, no. 2, p. 76–81, 1990. DOI 10.1115/1.2929650. Available at: <https://doi.org/10.1115/1.2929650>.
- GOUGH, D.; OLIVER, S.; THOMAS, J. **An Introduction to Systematic Reviews**. 2ª Edição. London, UK: SAGE, 2017.
- GUARINO, F.; DERMARDIROS, V.; CHEN, Y.; RAO, J.; ATHIENITIS, A.; CELLURA, M.; MISTRETTA, M. PCM thermal energy storage in buildings: Experimental study and applications. **Energy Procedia**, vol. 70, p. 219–228, 2015. DOI 10.1016/j.egypro.2015.02.118. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.118>.
- GUICHARD, S.; MIRANVILLE, F.; BIGOT, D.; MALET-DAMOUR, B.; BEDDIAR, K.; BOYER, H. A complex roof incorporating phase change material for improving thermal comfort in a dedicated test cell. **Renewable Energy**, vol. 101, p. 450–461, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.018>.
- GUIMARÃES, R. C. **Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao estudo do Desempenho de Estacas Escavadas**. 2002. 183 f. Universidade de Brasília, 2002.
- HARRIS, D. J.; HELWIG, N. Solar chimney and building ventilation. **Applied Energy**, vol. 84, no. 2, p. 135–146, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.07.001>.
- HAWES, D. W.; FELDMAN, D.; BANU, D. Latent heat storage in building materials. **Energy and Buildings**, vol. 20, no. 1, p. 77–86, 1993. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(93\)90040-2](https://doi.org/10.1016/0378-7788(93)90040-2).
- HAYTER, A. J. A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative. **The Annal of Statistics**, vol. 12, no. 1, p. 61–75, 1984. .
- HITCHMOUGH, M.; HOLDEN, N.; JOHNSON, M.; KINGSTONE, D.; PHILLIP, M.; SPEAKES, N.; WEBSTER, J. The design of the co-operative head office, Manchester. 2011. **Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association [...]**. 2011. p. 413–420.
- HU, J.; YU, X. Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions. **Solar Energy**, vol. 193, no. October, p. 866–877, 2019. DOI 10.1016/j.solener.2019.10.021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.021>.
- IEA. **Early design guidance for low energy cooling technologies**. 1999.
- IOMMI, M. The mediterranean smart adaptive wall. An experimental design of a smart and adaptive facade module for the mediterranean climate. **Energy and Buildings**, vol. 158, p. 1450–1460, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.025>.
- JI, R.; ZOU, Z.; CHEN, M.; ZHENG, Y.; QU, S. Numerical assessing energy performance for building envelopes with phase change material. **International Journal of Energy Research**, vol. 43, no. 12, p. 6222–6232, 2019. <https://doi.org/10.1002/er.4293>.
- JOMEHZADEH, F.; NEJAT, P.; CALAUTIT, J. K.; YUSOF, M. B. M.; ZAKI, S. A.; HUGHES, B. R.; YAZID, M. N. A. W. M. A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 70, p. 736–756, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>.
- KANTH, A.; CHAKRABORTY, T. Numerical analysis of geothermal tunnels. **J. Res. Eng. Technol.**, vol. 4, p. 740–746,

2015. .

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. Wind-induced natural ventilation analysis. **Solar Energy**, vol. 81, no. 1, p. 20–30, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.013>.

KAUSHAL, M. Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review. **Energy and Buildings**, vol. 139, p. 634–652, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.024>.

KAUSHAL, M.; DHIMAN, P.; SINGH, S.; PATEL, H. Finite volume and response surface methodology based performance prediction and optimization of a hybrid earth to air tunnel heat exchanger. **Energy and Buildings**, vol. 104, p. 25–35, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.014>.

KHANAL, R.; LEI, C. Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney. **Solar Energy**, vol. 86, no. 9, p. 2783–2794, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.015>.

KHANAL, R.; LEI, C. Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation. **Energy and Buildings**, vol. 43, no. 8, p. 1811–1819, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.035>.

KITCHENHAM, B. A. **Procedures for performing systematic reviews**. Department of Computer Science, Keele University, 2004.

KÖSE, E.; MANIOĞLU, G. Evaluation of the performance of a building envelope constructed with phase-change materials in relation to orientation in different climatic regions. **E3S Web of Conferences**, vol. 111, no. 201 9, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911104003>.

KUSUSDA, T.; ACHENBACH, P. R. Earth Temperatures and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. **ASHRAE Transactions**, vol. 71, no. 1, p. 61–74, 1965. .

LABS, K. Passive cooling. **Cambridge Massachusetts**. 1989.

LAL, S.; KAUSHIK, S.; BHARGAV, P. Solar chimney: a sustainable approach for ventilation and building space conditioning. **Int J Dev Sustain**, vol. 2, no. 1, p. 277–297, 2013. .

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2014.

LARSEN, T. S.; HEISELBERG, P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. **Energy and Buildings**, vol. 40, no. 6, p. 1031–1040, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.012>.

LE, V. V.; NGUYEN, L. H. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments (JMERD) DESIGN AND FABRICATION OF DISTILLATION EQUIPMENT OF FRESH WATER. vol. 42, no. 2, p. 79–83, 2019. .

LEE, D.-S.; HUNG, T.-C.; LIN, J.-R.; ZHAO, J. Experimental investigations on solar chimney for optimal heat collection to be utilized in organic Rankine cycle. **Applied Energy**, vol. 154, p. 651–662, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.079>.

LEE, K.H.; STRAND, R. K. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. **Energy and Buildings**, vol. 41, no. 6, p. 615–621, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.12.006>.

LEE, Kwang Ho; STRAND, R. K. Implementation of an Earth Tube System Into EnergyPlus Program. **Simbuild 2006**, no. March, p. 58–66, 2006. Available at: http://www.ibpsa.org/proceedings/SB2006/SB2006_papers.zip%5Cnhttps://www.scribd.com/doc/193820500/Earth-Tube-Design%5Cnhttp://eetd.lbl.gov/node/52040%5Cnhttps://www.researchgate.net/publication/240638104_IMPLEMENTATION_OF_AN_EARTH_TUBE_SYSTEM_INTO_EN.

LEI, J.; YANG, J.; YANG, E. H. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for

- cooling load reduction in tropical Singapore. **Applied Energy**, vol. 162, p. 207–217, 2016. DOI 10.1016/j.apenergy.2015.10.031. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.031>.
- LEON, M. A.; KUMAR, S. Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. **Solar Energy**, vol. 81, no. 1, p. 62–75, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.017>.
- LI, H.; YU, Y.; NIU, F.; SHAFIK, M.; CHEN, B. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. **Renewable Energy**, vol. 62, p. 468–477, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.008>.
- LIU, Q.; DU, Z.; FAN, Y. Heat and mass transfer behavior prediction and thermal performance analysis of earth-to-air heat exchanger by finite volume method. **Energies**, vol. 11, no. 6, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11061542>.
- LIU, Z.; YU, Z. J.; YANG, T.; EL MANKIBI, M.; ROCCAMENA, L.; SUN, Y.; SUN, P.; LI, S.; ZHANG, G. Experimental and numerical study of a vertical earth-to-air heat exchanger system integrated with annular phase change material. **Energy Conversion and Management**, vol. 186, p. 433–449, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.069>.
- LOPES, A. F. O. **Da Simulação ao Projeto: Avaliação de conforto térmico em ambiente escolar padronizado**. 2020. 153 f. Universidade de Brasília, 2020.
- MACIEL, A. A. **Projeto bioclimático em Brasília: Estudo de caso em edifício de escritórios**. 2002. 138 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- MADHUMATHI, A.; SUNDARRAJA, M. C. Energy efficiency in buildings in hot humid climatic regions using phase change materials as thermal mass in building envelope. **Energy and Environment**, vol. 25, no. 8, p. 1405–1421, 2014. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.25.8.1405>.
- MAEREFAT, M.; HAGHIGHI, A. P. Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. **Renewable Energy**, vol. 35, no. 10, p. 2316–2324, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.003>.
- MAJUMDAR, M. Energy-efficient buildings in India. **Tata Energy Research Institute(TERI)**, 2001. .
- MANCA, O.; NARDINI, S.; ROMANO, P.; MIHAILOV, E. Numerical investigation of thermal and fluid dynamic behavior of solar chimney building systems. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, vol. 49, no. 1, p. 106–116, 2014. .
- MAO, Q.; YANG, M. Study on heat transfer performance of a solar double-slope PCM glazed roof with different physical parameters. **Energy and Buildings**, vol. 223, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110141>.
- MARIN, P.; SAFFARI, M.; DE GRACIA, A.; ZHU, X.; FARID, M. M.; CABEZA, L. F.; USHAK, S. Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. **Energy and Buildings**, vol. 129, p. 274–283, 2016. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.08.007. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>.
- MATHUR, A.; PRIYAM; MATHUR, S.; AGRAWAL, G. D.; MATHUR, J. Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes. **Renewable Energy**, vol. 108, p. 474–487, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.001>.
- MATHUR, J.; BANSAL, N. K.; MATHUR, S.; JAIN, M.; ANUPMA. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. **Solar Energy**, vol. 80, no. 8, p. 927–935, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.008>.
- MEMARIAN, S.; KARI, B. M.; FAYAZ, R.; ASADI, S. Single and combined phase change materials: Their effect on seasonal transition period. **Energy and Buildings**, vol. 169, p. 453–472, 2018. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.03.085. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.085>.
- MENEZES, M. S. **Refrigeração e Ar-condicionado**. Passo Fundo - RS, 2005.
- MOGHARREB, M. M.; ABBASPOUR-FARD, M. H.; GOLDANI, M.; EMADI, B. The effect of greenhouse vegetation

- coverage and area on the performance of an earth-to-air heat exchanger for heating and cooling modes. **International Journal of Sustainable Engineering**, vol. 7, no. 3, p. 245–252, 2014. <https://doi.org/10.1080/19397038.2013.811559>.
- MONGHASEMI, N.; VADIEE, A. A review of solar chimney integrated systems for space heating and cooling application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 81, p. 2714–2730, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.078>.
- MONGKON, S.; THEPA, S.; NAMPRAKAI, P.; PRATINTHONG, N. Cooling performance and condensation evaluation of horizontal earth tube system for the tropical greenhouse. **Energy and Buildings**, vol. 66, p. 104–111, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.009>.
- MORSHED, W.; LESO, L.; CONTI, L.; ROSSI, G.; SIMONINI, S.; BARBARI, M. Cooling performance of earth-to-air heat exchangers applied to a poultry barn in semi-desert areas of south Iraq. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, vol. 11, no. 3, p. 47–53, 2018. <https://doi.org/10.25165/ij.ijabe.20181103.3047>.
- NAZI, W. I. W. M.; WANG, Y.; CHEN, H.; ZHANG, X.; PAUL ROSKILLY, A. Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High-rise Office Building in Tropical Climate. **Energy Procedia**, vol. 142, p. 2295–2302, 2017. DOI 10.1016/j.egypro.2017.12.632. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.632>.
- NEMATCHOUA, M. K.; NOELSON, J. C. V.; SAADI, I.; KENFACK, H.; ANDRIANAHARINJAKA, A.-Z. F. R.; NGOUMDOUM, D. F.; SELA, J. B.; REITER, S. Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates. **Solar Energy**, vol. 207, p. 458–470, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.110>.
- NEMATCHOUA, M. K.; VANONA, J. C.; OROSA, J. A. Energy efficiency and thermal performance of office buildings integrated with passive strategies in coastal regions of humid and hot tropical climates in Madagascar. **Applied Sciences (Switzerland)**, vol. 10, no. 7, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10072438>.
- NEVES, L. de O. **Chaminé Solar como Elemento Indutor de Ventilação Natural em Edificações**. 2012. 158 f. Univerdade de Campinas, 2012.
- NOUANÉGUÉ, H. F.; BILGEN, E. Heat transfer by convection, conduction and radiation in solar chimney systems for ventilation of dwellings. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 30, no. 1, p. 150–157, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.08.006>.
- OMER, A. M. Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 12, no. 6, p. 1562–1587, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.010>.
- OZGENER, L. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, no. 9, p. 4483–4490, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.103>.
- PACHECO, R.; ORDÓÑEZ, J.; MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, no. 6, p. 3559–3573, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 11, no. 5, p. 1633–1644, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- PERÉN, J. I.; VAN HOOFF, T.; LEITE, B. C. C.; BLOCKEN, B. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. **Building and Environment**, vol. 85, p. 263–276, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.007>.
- PERETTI, C.; ZARRELLA, A.; DE CARLI, M.; ZECCHIN, R. The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 28, p. 107–116, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.057>.

PILLAI, P. K. C.; AGARWAL, R. C. Factors influencing solar energy collector efficiency. **Appl Energy**, vol. 8, p. 205–213, 1981. .

PISELLI, C.; CASTALDO, V. L.; PISELLO, A. L. How to enhance thermal energy storage effect of PCM in roofs with varying solar reflectance: Experimental and numerical assessment of a new roof system for passive cooling in different climate conditions. **Solar Energy**, vol. 192, p. 106–119, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.047>.

PRIYADARSINI, R.; CHEONG, K. W.; WONG, N. H. Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system. **Energy and Buildings**, vol. 36, no. 1, p. 61–71, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00076-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00076-8).

RAOUX, S. **Phase change materials**. 2009. vol. 39, . <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-082908-145405>.

RATHORE, P.K.S.; SHUKLA, S. K.; GUPTA, N. K. Yearly analysis of peak temperature, thermal amplitude, time lag and decrement factor of a building envelope in tropical climate. **Journal of Building Engineering**, vol. 31, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101459>.

RATHORE, Pushpendra Kumar Singh; SHUKLA, S. K. An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. **Renewable Energy**, no. xxxx, 2019. DOI 10.1016/j.renene.2019.10.130. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.130>.

REATTO, A.; MARTINS, É. de S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO, O. A. **Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo**. Brasília, 2004.

REY-HERNÁNDEZ, J. M.; VELASCO-GÓMEZ, E.; SAN JOSÉ-ALONSO, J. F.; TEJERO-GONZÁLEZ, A.; REY-MARTÍNEZ, F. J. Energy analysis at a near zero energy building. A case-study in Spain. **Energies**, vol. 11, no. 4, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11040857>.

RIBEIRO, J. F., & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: EMBRAPA (ed.). **Cerrado : ambiente e flora**. 1ª Edição. Planaltina: CPAC, 1998. p. 86–166. Available at: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/136069/1/fitofisionomias-do-Bioma-Cerrado-2.pdf>.

RICHARDSON, M. J.; WOODS, A. W. An analysis of phase change material as thermal mass. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, vol. 464, no. 2092, p. 1029–1056, 2008. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.0312>.

RODRIGUES, L. T.; GILLOTT, M. A novel low-carbon space conditioning system incorporating phase-change materials and earth-air heat exchangers. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, vol. 10, no. 3, p. 176–187, 2013. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt023>.

RORIZ, M. **Desempenho de chaminés solares para indução da ventilação natural em edificações submetidas a climas típicos do Brasil. Relatório científico final**. São Carlos, SP, 2010.

RUSCHEL, R. C.; NEVES, L. de O.; BERNARDINI, S. P.; MOREIRA, D. de C. Revisões Sistemáticas da Literatura: Parte II. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, vol. 8, no. 4, p. 217–219, 2017. <https://doi.org/10.20396/parc.v8i4.8652036>.

SAIKIA, P.; PANCHOLI, M.; SOOD, D.; RAKSHIT, D. Dynamic optimization of multi-retrofit building envelope for enhanced energy performance with a case study in hot Indian climate. **Energy**, vol. 197, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117263>.

SAIKIA, Pranaynil; AZAD, A. S.; RAKSHIT, D. Thermodynamic analysis of directionally influenced phase change material embedded building walls. **International Journal of Thermal Sciences**, vol. 126, no. December 2017, p. 105–117, 2018. DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.029. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.029>.

SAKONIDOU, E. P.; KARAPANTSIOS, T. D.; BALOUKTSIS, A. I.; CHASSAPIS, D. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. **Solar Energy**, vol. 82, no. 1, p. 80–94, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.001>.

SANTAMOURIS, M.; DING, L.; FIORITO, F.; OLDFIELD, P.; OSMOND, P.; PAOLINI, R.; PRASAD, D.; SYNNEFA, A. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. **Solar Energy**, vol. 154, p. 14–33, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>.

SCHELLER, C.; MELO, A. P.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. **Do Desempenho Energético De Edificações**. Florianópolis, 2015.

SERAGELDIN, A. A.; ABDELRAHMAN, A. K.; OOKAWARA, S. Parametric study and optimization of a solar chimney passive ventilation system coupled with an earth-to-air heat exchanger. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, vol. 30, p. 263–278, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.10.010>.

SHI, L.; ZHANG, G.; CHENG, X.; GUO, Y.; WANG, J.; CHEW, M. Y. L. Developing an empirical model for roof solar chimney based on experimental data from various test rigs. **Building and Environment**, vol. 110, p. 115–128, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.002>.

SHI, Long; ZHANG, G.; YANG, W.; HUANG, D.; CHENG, X.; SETUNGE, S. Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 88, no. September 2017, p. 223–238, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2018.02.033. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.033>.

SILVA, C. F. e. **O conforto térmico de cavidades urbanas: contexto climático do Distrito Federal**. 2013. 175 f. Universidade de Brasília, 2013.

SOARES, N.; COSTA, J. J.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. **Energy and Buildings**, vol. 59, p. 82–103, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>.

SOBTI, J.; SINGH, S. K. Earth-air heat exchanger as a green retrofit for Chandigarh—a critical review. **Geothermal Energy**, vol. 3, no. 1, 2015. <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0034-4>.

SOLGI, E.; FAYAZ, R.; KARI, B. M. Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation. **Renewable Energy**, vol. 85, p. 725–731, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.028>.

SOLGI, E.; HAMEDANI, Z.; FERNANDO, R.; MOHAMMAD KARI, B.; SKATES, H. A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. **Building and Environment**, vol. 147, p. 327–336, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.031>.

SOLGI, E.; KARI, B. M.; FAYAZ, R.; TAHERI, H. The impact of phase change materials assisted night purge ventilation on the indoor thermal conditions of office buildings in hot-arid climates. **Energy and Buildings**, vol. 150, p. 488–497, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.035>.

SOLGI, Ebrahim; HAMEDANI, Z.; FERNANDO, R.; MOHAMMAD KARI, B. A parametric study of phase change material characteristics when coupled with thermal insulation for different Australian climatic zones. **Building and Environment**, vol. 163, no. June, p. 106317, 2019. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.106317. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106317>.

SOLGI, Ebrahim; MEMARIAN, S.; NEMATI MOUD, G. Financial viability of PCMs in countries with low energy cost: A case study of different climates in Iran. **Energy and Buildings**, vol. 173, p. 128–137, 2018. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.05.028. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.028>.

SOMSILA, P.; TEEBOONMA, U.; SEEHANAM, W. Investigation of buoyancy air flow inside solar chimney using CFD technique. **Proceedings of the international conference on energy and sustainable development**, , p. 1–7, 2010. .

SONI, S. K.; PANDEY, M.; BARTARIA, V. N. Ground coupled heat exchangers: A review and applications. **Renewable**

and **Sustainable Energy Reviews**, vol. 47, p. 83–92, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.014>.

SOUZA JR, R. P. **Estudo Paramétrico da Resposta Térmica de Grupos de Estacas Trocadoras de Calor em um Solo Tropical Típico do DF**. 2017. 166 f. Universidade de Brasília, 2017.

SOVETOVA, M.; MEMON, S. A.; KIM, J. Thermal performance and energy efficiency of building integrated with PCMs in hot desert climate region. **Solar Energy**, vol. 189, no. April, p. 357–371, 2019. DOI 10.1016/j.solener.2019.07.067. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.067>.

SPENCER, S. **An experimental investigation of a solar chimney natural ventilation system**. 2001. Concordia University, Canadá, 2001.

SUPARWOKO. Room temperatures comparison based on earth cooling tubes with and without stone exposure: Office building case study in Yogyakarta, Indonesia. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, vol. 9, no. 13, p. 1296–1307, 2018. .

TABARES-VELASCO, P. C.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, vol. 54, p. 186–196, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019>.

TAN, A. Y. K.; WONG, N. H. Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics. **Solar Energy**, vol. 102, p. 116–125, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.023>.

TAN, A. Y. K.; WONG, N. H. Parameterization studies of solar chimneys in the tropics. **Energies**, vol. 6, no. 1, p. 145–163, 2013. <https://doi.org/10.3390/en6010145>.

TELI, D.; JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B. Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. **Energy and Buildings**, vol. 53, p. 166–182, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.022>.

TER MORS, S.; HENSEN, J. L. M.; LOOMANS, M. G. L. C.; BOERSTRA, A. C. Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: Creating and validating PMV-based comfort charts. **Building and Environment**, vol. 46, no. 12, p. 2454–2461, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.025>.

TIAN TAN, M. S. **Sensitivity and Uncertainty Analysis of Building Parameters Integrating Energy , Daylight and Thermal Comfort**. 2019. 131 f. Lund University, 2019.

TUCKER, R.; IZADPANAHI, P. Live green, think green: Sustainable school architecture and children’s environmental attitudes and behaviors. **Journal of Environmental Psychology**, vol. 51, p. 209–216, 2017. DOI 10.1016/j.jenvp.2017.04.003. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.04.003>.

UNITED NATIONS. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **a/Res/70/1**, , p. 1–49, 2015. Available at: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E.

VALLADARES-RENDÓN, L. G.; SCHMID, G.; LO, S. L. Review on energy savings by solar control techniques and optimal building orientation for the strategic placement of façade shading systems. **Energy and Buildings**, vol. 140, no. 71, p. 458–479, 2017. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.12.073. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.073>.

VAZ, J.; SATTLER, M. A.; BRUM, R. D. S.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE). **Energy and Buildings**, vol. 72, p. 122–131, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.009>.

VAZ, J.; SATTLER, M. A.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger. **Energy and Buildings**, vol. 43, no. 9, p. 2476–2482, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.003>.

WAHID, M. A.; HOSSEINI, S. E.; HUSSEN, H. M.; AKEIBER, H. J.; SAUD, S. N.; MOHAMMAD, A. T. An overview of

- phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. **Applied Thermal Engineering**, vol. 112, p. 1240–1259, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032>.
- WEI, D.; QIRONG, Y.; JINCUI, Z. A study of the ventilation performance of a series of connected solar chimneys integrated with building. **Renewable Energy**, vol. 36, no. 1, p. 265–271, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.030>.
- WWF-BRASIL. **Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília**. Brasília, 2016.
- YAN, T.; GAO, J.; XU, X.; XU, T.; LING, Z.; YU, J. Dynamic simplified PCM models for the pipe-encapsulated PCM wall system for self-activated heat removal. **International Journal of Thermal Sciences**, vol. 144, p. 27–41, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.05.015>.
- YANG, D.; ZHANG, J. Analysis and experiments on the periodically fluctuating air temperature in a building with earth-air tube ventilation. **Building and Environment**, vol. 85, p. 29–39, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.019>.
- YANG, M.; WANG, P.; YANG, X.; SHAN, M. Experimental analysis on thermal performance of a solar air collector with a single pass. **Building and Environment**, vol. 56, p. 361–369, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.009>.
- YIN, W.; ZHANG, G.; YANG, W.; WANG, X. Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China. **Building and Environment**, vol. 45, no. 2, p. 338–344, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.012>.
- ZHAI, X. Q.; DAI, Y. J.; WANG, R. Z. Experimental investigation on air heating and natural ventilation of a solar air collector. **Energy and Buildings**, vol. 37, no. 4, p. 373–381, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.07.006>.
- ZHENG, M. J.; PAN, S.; YOSHIDA, H. Commissioning of a coupled earth tube and natural ventilation system. 3., 2011. **7th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning - Proceedings of ISHVAC 2011 [...]**. 2011. vol. 3, p. 963–970.
- ZHOU, D.; ZHAO, C. Y.; TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, vol. 92, p. 593–605, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>.
- ZIMMERMANN, M.; REMUND, S. IEA-ECBCS annex 28 subtask 2 report 2, chapter F ground coupled air systems. Low energy cooling technology selection and early design guidance. **Construction Research Communications**, , p. 95–109, 2001. .
- ZOMORODIAN, Z. S.; TAHSILDOOST, M.; HAFEZI, M. Thermal comfort in educational buildings: A review article. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 59, p. 895–906, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>.

Apêndice A – Modelagem computacional DesignBuilder

A modelagem computacional, para a composição geométricas das superfícies, foi realizada no software *DesignBuilder*, traduzindo as formas geométricas do projeto original em um modelo simplificado, por meio da técnica shoebox. As dimensões ajustadas são apresentadas nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45.

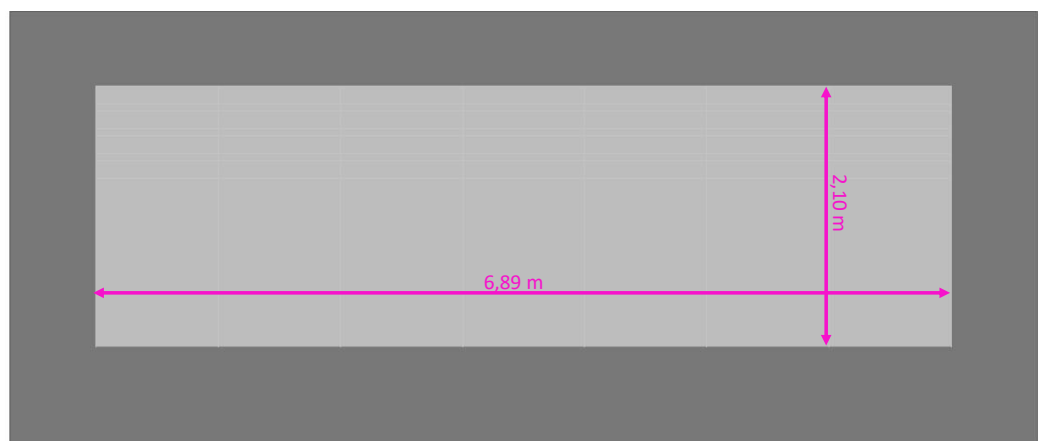
Figura 43 – Dimensionamento da área de piso do modelo simplificado



Fonte: O autor

A altura da edificação possui o valor de 3,5 metros. A altura do peitoril das janelas da fachada frontal é de 0,8 metros e da fachada posterior é de 2,1 metros.

Figura 44 – Dimensionamento da janela da fachada frontal



Fonte: O autor

Figura 45 – Dimensionamento da janela da fachada posterior



Fonte: O autor

Os materiais construtivos das paredes e cobertura, além dos vidros das janelas e portas, foram configurados (Figura 58 para a parede) no *DesignBuilder* seguindo os relatórios do LabEEE, disponíveis no site:

- https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Biblioteca_ComponentesConstrutivos_o.pdf . Acessado no dia 30/03/2021

As paredes em todos os modelos possuem emissividade de 0,9 e absorvância de 0,3 (cor clara). Os materiais foram resumidos em um material (Figura 46) que apresenta resistência térmica de 0,55 m²K/W e capacidade térmica de 161 kJ/m²K, e a cobertura possuindo 1,946 m²K/W.

Figura 46 – Propriedades físicas da tipologia original das paredes da escola padrão

Thermal Properties	
Detailed properties	
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m-K)	0,3637
Specific Heat (J/kg-K)	1000,00
Density (kg/m ³)	805,00

Fonte: O autor

Todas as janelas foram constituídas com vidro simples, incolor de 6mm, com propriedades (Figura 47) seguindo o catálogo elaborado pela CB3E e ABIVIDRO, disponíveis no site:

- https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/catalogo-propriedades-vidros-comercializados-brasil-13032015_v2.pdf . Acessado no dia 30/03/2021

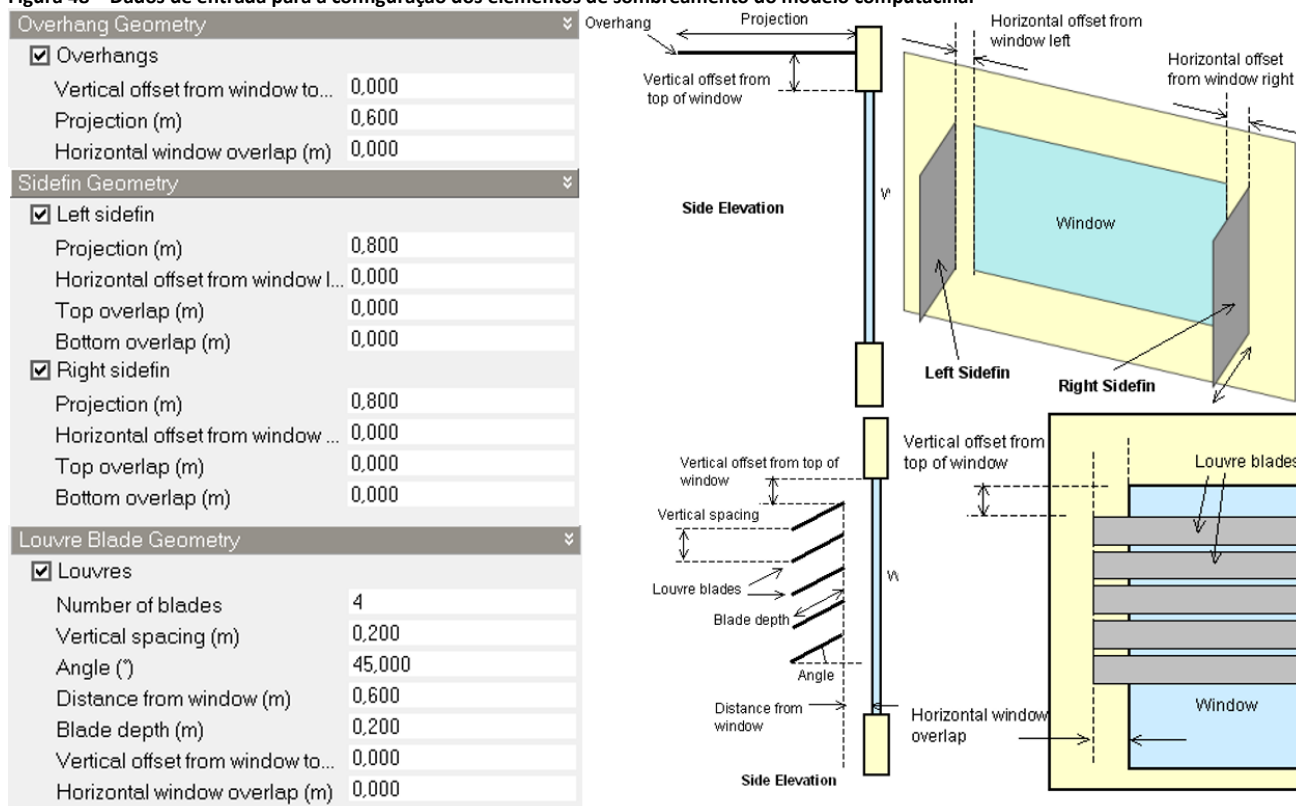
Figura 47 – Propriedades físicas dos vidros das janelas

Simple Definition	
Total solar transmission (SHGC)	0,870
Light transmission	0,660
U-Value (W/m²-K)	5,740

Fonte: O autor

O sombreamento da edificação foi configurado no *DesignBuilder* pela opção *Local Shading*, que modela diversos tipos de elementos de sombreamento. O resumo das configurações utilizadas são apresentadas pela Figura 48.

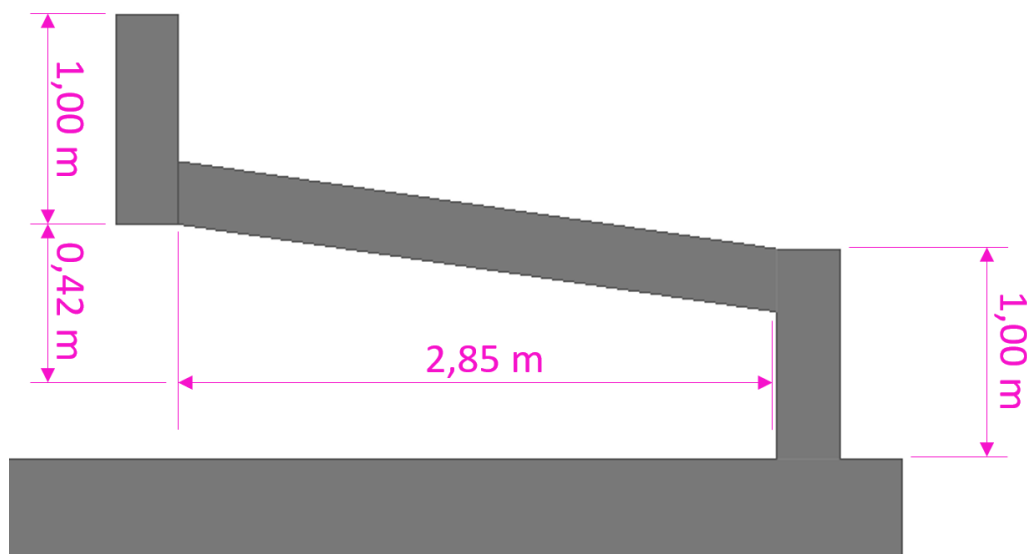
Figura 48 – Dados de entrada para a configuração dos elementos de sombreamento do modelo computacional



Fonte: O autor

Além da edificação em si, foi modelado a chaminé solar geometricamente e inserida no modelo computacional como um anexo da própria edificação. A Figura 49 apresenta o dimensionamento dessa chaminé, descontando os valores de comprimento, já que é um argumento variável, com incrementos em seu valor até determinados limites.

Figura 49 – Dimensionamento da chaminé solar inserida no modelo computacional



Fonte: O autor

Apêndice B – Modelagem matemática do EAHE

O modelo utilizado neste projeto foi desenvolvido por Lee e Strand (2010), implementado no programa *EnergyPlus*. Certas simplificações inerentes ao modelo matemático foram consideradas pelos autores, se beneficiando com simulações mais rápidas, pois o *EnergyPlus* é um programa de simulação com resultados horários dentro de um ou mais anos, assim requerendo uma máquina de cálculo eficiente. As principais simplificações deste modelo foram:

- A taxa de transferência de calor é constante na direção radial da tubulação.
- Escoamento do fluido é térmica e hidrodinamicamente desenvolvido.
- A temperatura do solo é não-perturbada, sendo calculada pelo modelo desenvolvido por Kusuda e Achenbach.
- A temperatura do solo não é influenciada pelo tubo.
- As propriedades térmicas do solo homogêneo são constantes.
- A área axial do tubo é constante, e o fluxo é axi-simétrico em direção a sua seção.
- Transferência de calor em regime estacionário.

Primeiramente, deve ser calculado a temperatura do solo ao redor do tubo, tendo a expressão da temperatura de superfície do solo como base da equação desenvolvida, de acordo com Kusuda e Achenbach (1965):

$$T_{sur} = T_m + Re(e^{i\omega t}) \quad (4)$$

onde,

T_{sur} = perfil de temperatura do solo em sua superfície;

T_m = valor da média anual da temperatura de superfície do solo;

Esta expressão é necessária como base para a avaliação da temperatura do solo em uma certa altura específica, porém, como está sendo avaliado a temperatura do solo ao redor de um tubo, esta expressão deverá ser desenvolvida avaliando a transferência de calor convectiva E_{conv} , a absorção da radiação solar pelo solo E_{radsol} , a radiação de onda longa emitida pelo solo $E_{radlong}$, e o calor latente perdido devido a evaporação E_{lat} . Mediante a soma desses mecanismos descritos, a taxa transferência de calor da área avaliada do solo:

$$-k_s \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = E_{conv} - E_{radlong} + E_{radsol} - E_{lat} \quad (5)$$

onde,

k_s = condutividade térmica do solo (W/m°C)

Segundo Lee e Strand, após o rearranjo da equação 4.2 para resolver T_m , este pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$T_m = \frac{1}{h_c} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0.0168 h_s f b (1 - r_a)] \quad (6)$$

A amplitude da variação da temperatura de superfície do solo avaliada A_s , após a avaliação do período constante da superfície do solo t_0 , e da diferença angular do período entre o ar e a temperatura de superfície do solo φ_s , é inserida na equação 4.3. Assim, assumindo uma constante de difusividade térmica do solo como homogênea, a temperatura do solo em qualquer profundidade z e tempo t pode ser estimado pela expressão (LABS, 1989):

$$T_{solo} = T_m - A_s \exp \left[-z \left(\frac{\pi}{365 \alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{\pi \alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (7)$$

onde,

α_s = difusividade térmica do solo.

A_s = amplitude da temperatura de superfície do solo.

z = profundidade do tubo.

t_0 = Constante de fase da temperatura de superfície do solo.

t = dia selecionado do ano

Para calcular a transferência de calor entre a tubulação enterrada e o solo em torno do tubo, o coeficiente de transferência de calor global desta situação deve ser calculado por meio das seguintes expressões, utilizando três valores de resistência térmica:

$$U_t = \frac{1}{R_t} \quad (8)$$

$$R_t = R_c + R_p + R_s \quad (9)$$

onde,

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_1 L h_c} \quad (10)$$

$$R_p = \frac{1}{2\pi L k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1} \quad (11)$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi L k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2} \quad (12)$$

sendo,

R_c = resistência térmica devido a transferência de calor por convecção entre o ar na tubulação e a superfície interna desta, sendo h_c (coeficiente convectivo) sendo função do número de Reynolds e do número de Nusselt;

R_p = resistência térmica devido a transferência de calor por condução entre a superfície interna e externa do tubo;

R_s = resistência térmica devido a transferência de calor por condução entre a superfície externa da tubulação e o solo não perturbado.

r_1 , r_2 e r_3 = raio interno do tubo, sua espessura e a distância de seu raio externo do solo não perturbado.

Agora, a transferência de calor entre o solo e o ar dentro da tubulação, para um comprimento diferencial, é igual a quantidade de calor armazenado pelo ar, resultando em uma temperatura uniforme ao longo do comprimento do tubo, simplificando o modelo (Mihalakakou et al. 1989),

$$U_t dy [T_a(y) - T_{z,t}] = -\dot{m}_a C_a [dT_a(y)] \quad (13)$$

sendo,

y = comprimento da tubulação como variável.

A temperatura de saída do ar da tubulação é avaliada, considerando que a temperatura do ar de entrada da tubulação ($y = 0$) é igual à temperatura do ar externa (ambiente). Assim, integrando os dois lados da equação 4.10, a seguinte expressão pode ser obtida:

$$C = \dot{m}_a C_a \ln |T_{am} - T_{z,t}| \quad (14)$$

Assim, o valor da temperatura em função ao comprimento da tubulação pode ser finalmente avaliado por meio da resolução da temperatura do ar interno da tubulação $T_a(y)$, para o ar de saída da tubulação onde $y = L$:

no caso de $T_{am} > T_{z,t}$,

$$T_{tub,saída}(L) = T_{z,t} + e^A \quad (15)$$

no caso de $T_{am} = T_{z,t}$,

$$T_{tub,saída}(L) = T_{z,t} \quad (16)$$

no caso de $T_{am} < T_{z,t}$,

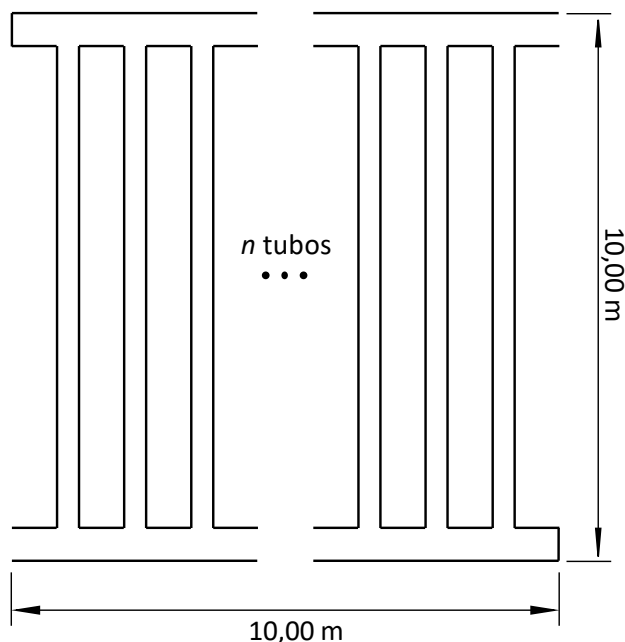
$$T_{tub,saída}(L) = T_{z,t} - e^A \quad (17)$$

onde,

$$A = \frac{\dot{m}_a C_a \ln |T_{am} - T_{z,t}| - U_t L}{\dot{m}_a C_a} \quad (18)$$

Ao invés de uma única tubulação, a solução propõe o uso de tubulações em paralelo, como mostra a Figura 50. Essa configuração deixa o sistema mais compacto, contribuindo para as trocas de calor em uma curta distância de tubulação.

Figura 50 – Desenho representativo das EAHE com tubulações em paralelo

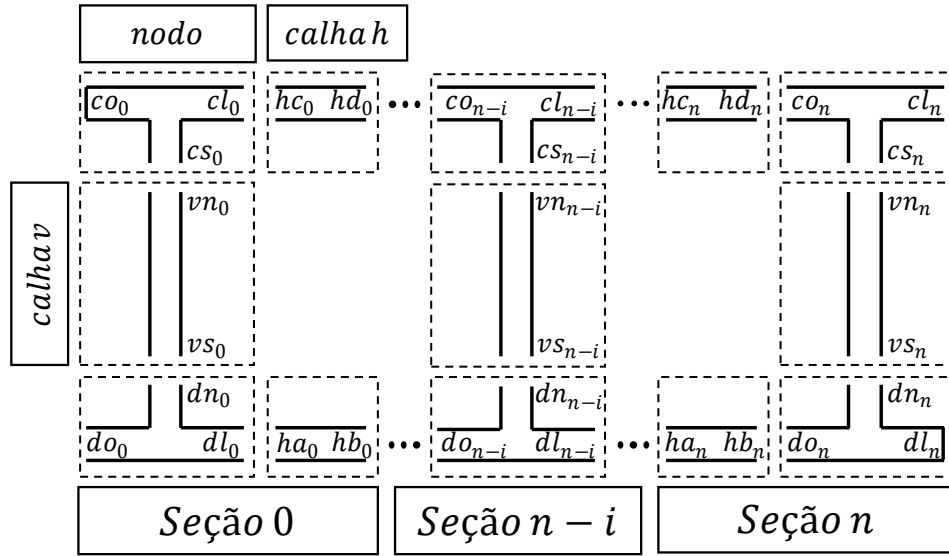


Fonte: O autor

Para modelar as trocas térmicas de uma tubulação em paralelo, seguiu-se parcialmente a metodologia proposta por Faria (2007), onde a tubulação é dividida e analisada por seções. A Figura 51 apresenta essa divisão, sendo que do_0 é o ponto de entrada, possuindo as propriedades ambientais do ar atmosférico, e o ponto de saída é o cl_n .

Para as outras extremidade do coletor, $co_0 = cs_0 = cl_0$ e $do_n = ds_n = dl_n$, onde n é o número de tubulações.

Figura 51 – Seccionamento das tubulações do EAHE para cálculo de transferência térmica e mássica



Fonte: O autor

A equação 18 desenvolvida anteriormente é aplicada às calhas da tubulação, sendo que o resultado da mistura dos fluidos provindos na união dessas calhas deve ser determinado. Para isso os nodos são utilizado como volume de controle, com entradas e saídas unidimensionais, onde para condições de regime permanente $\frac{\partial \rho}{\partial t} \equiv 0$, a equação da continuidade pode ser escrita como:

$$\sum_i (\rho_i A_i V_i)_{ent} = \sum_i (\rho_i A_i V_i)_{sai} \quad (19)$$

Assim, para a conservação de massa e energia, a relação em escoamento permanente pode ser escrita como:

$$\sum_i (\rho_i \dot{V}_i h_i)_{ent} = \sum_i (\rho_i \dot{V}_i h_i)_{sai} \quad (20)$$

Para obter a entalpia e a densidade do fluido, considera-se o sistema como isobárico (utiliza-se a pressão atmosférica consequentemente) e sem perdas latentes de calor, além das temperaturas das calhas já obtidas. As vazões são obtidas pelo método de Hardy-Cross, sendo $n = 2$, com as perdas de cargas por Darcy-Weisbach:

$$r = \frac{fL}{2gA^2D} \quad (21)$$

$$\sum \Delta h_0 = \sum r Q_0^n = 0 \quad (22)$$

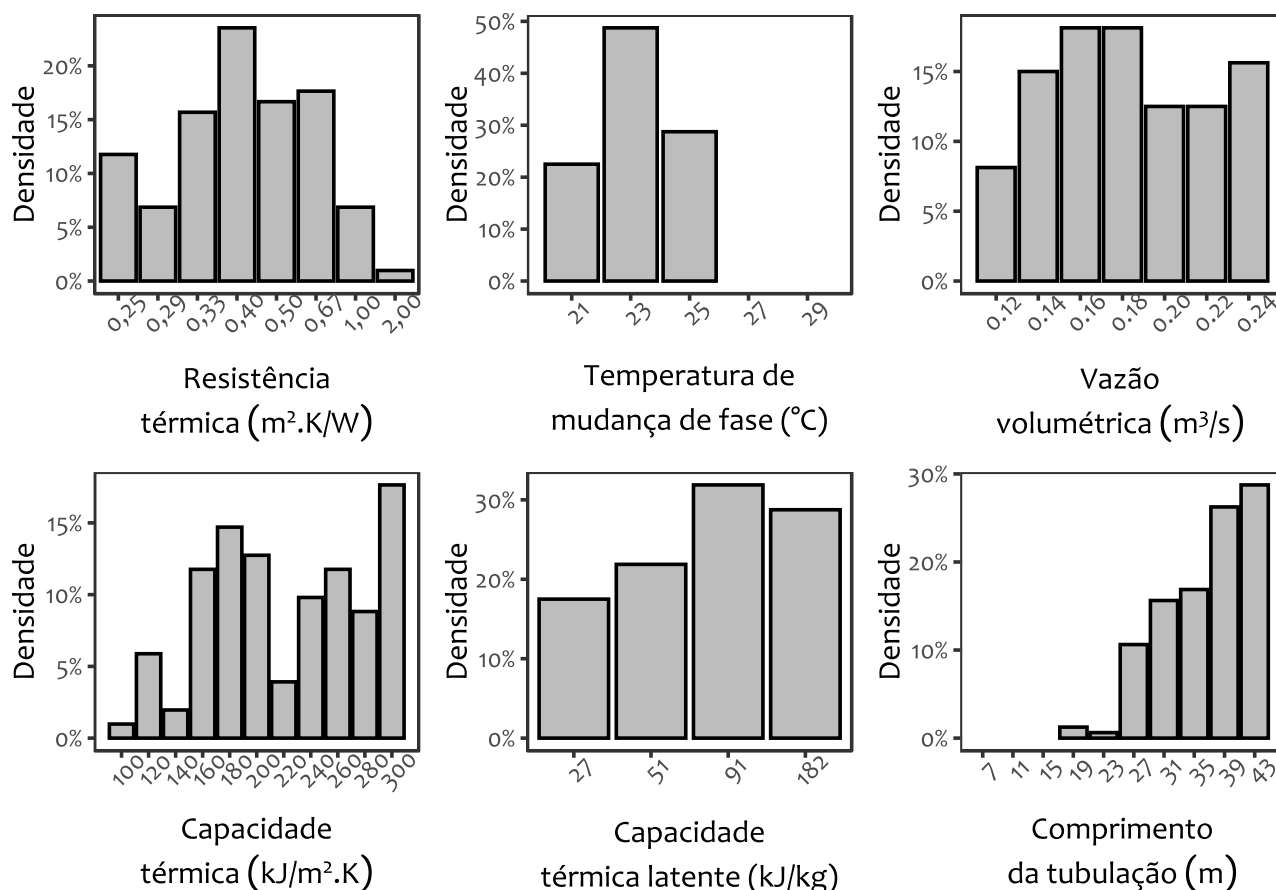
$$Q_1 = Q_0 + \Delta Q_0 \quad (23)$$

$$\Delta Q_0 = \frac{\sum \Delta h_0}{n \sum \Delta h_0 / Q_0} \quad (24)$$

Apêndice C – Densidade dos parâmetros para os melhores casos

Convencionou-se que os melhores resultados são os que possuem os maiores percentuais de horas ocupadas em conforto (POC). A Figura 52 apresenta os 10% melhores resultados de todas as simulação em forma de gráficos em barra, sem grupamento específico dos modelos de estratégia, totalizando 320 simulações, com uma extensão de valores de POC entre 83,85% e 85,67%. Para as próximas subseções, os parâmetros serão decompostos em modelos de estratégia, isolados e combinados.

Figura 52 – Densidade de frequência dos melhores resultados por parâmetros para todas os modelos de estratégias



Fonte: O autor

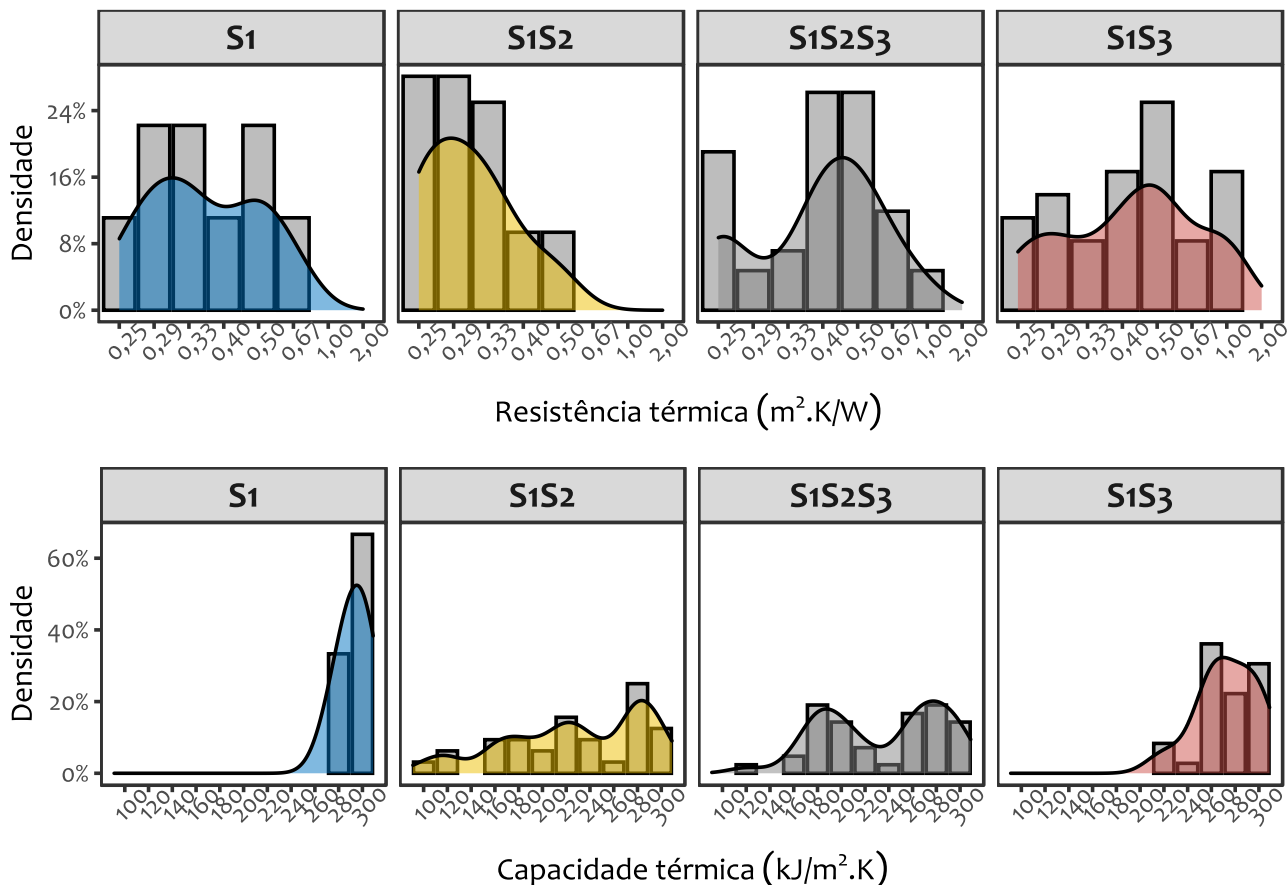
Os parâmetros que apresentam uma certa tendência para otimização de valores são a temperatura de mudança de fase do PCM e o comprimento da tubulação do EAHE, sendo destacados os valores de $23^{\circ}C$ e os comprimentos de 39 metros e 43 metros com maior densidade de frequência, que representa o número de casos por unidade de atributo do parâmetro.

A resistência térmica apresenta uma distribuição mais equilibrada, possuindo os valores centrais com uma maior densidade de frequência, sendo a extremidade direita ($1,0 m^2.K/W$ e $2,0 m^2.K/W$) em menor número. A capacidade térmica possui a maior densidade para o valor de $300 kJ/m^2.K$, porém os valores centrais também concentram grande densidade de ocorrência. Para a capacidade térmica latente, a densidade de frequência é diretamente proporcional a seus valores, porém pausando seu crescimento no valor de $91 kJ/kg$. Os valores de vazão volumétrica possuem uma distribuição balanceada, um pouco mais favoráveis para $0,16 m^3/s$ e $0,18 m^3/s$.

Análise dos melhores resultados – parâmetros físicos da parede

A Figura 53 apresenta a densidade de frequência dos valores de parâmetros físicos da parede, por meio de um gráfico de barras, que possui uma função de densidade para visualizar mais adequadamente seu comportamento. Seus valores foram divididos em grupos de modelo de estratégias, isoladas e combinadas, sendo os 10% melhores resultados para cada grupamento.

Figura 53 – Densidade de frequência dos melhores resultados para os parâmetros físicos da parede



Fonte: O autor

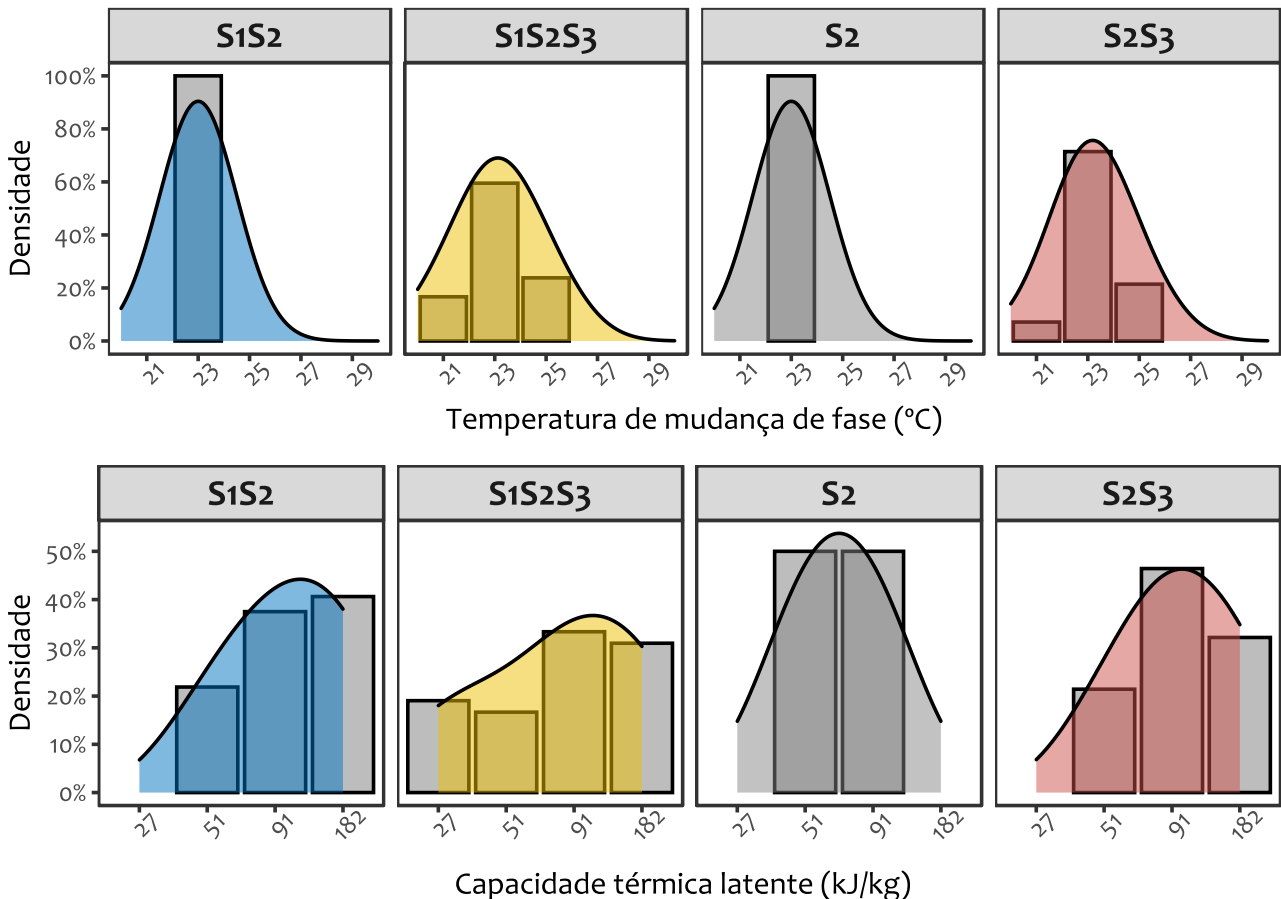
A principal tendência visualizada nos resultados para resistência térmica é a da ausência de casos para seus maiores valores (0,67 $m^2.K/W$, 1,0 $m^2.K/W$ e 2,0 $m^2.K/W$) de acordo com cada modelo, principalmente para o modelo combinado com PCM (S1S2), o qual possui os maiores valores de densidade para os menores valores-R. Para os outros modelos, a função de densidade permanece mais balanceada ao centro, não apresentando uma semelhança entre combinação de estratégias.

Para o parâmetro de capacidade térmica da parede, observa-se um pico de densidade para o modelo com a estratégia isolada (S1) entre os valores de 280 $kJ/m^2.K$ e 300 $kJ/m^2.K$. O mesmo ocorre quando a estratégia está combinada com um sistema EAHE, porém com uma maior extensão de valores à direita, com uma extensão maior de valores de comprimento. Agora, quando se é inserido o PCM, tanto para S1S2, quanto para S1S2S3, tal tendência é alterada, possuindo uma grande extensão de valores de capacidade térmica para praticamente todo seu alcance analisado.

Análise dos melhores resultados – parâmetros físicos do PCM

A Figura 54 apresenta a densidade de frequência dos valores de parâmetros físicos do PCM, por meio de um gráfico de barras, que possui uma função de densidade para visualizar mais adequadamente seu comportamento. Seus valores foram divididos em grupos de modelo de estratégias, isoladas e combinadas, sendo os 10% melhores resultados para cada grupamento.

Figura 54 – Densidade de frequência dos melhores resultados para os parâmetros físicos do PCM



Fonte: O autor

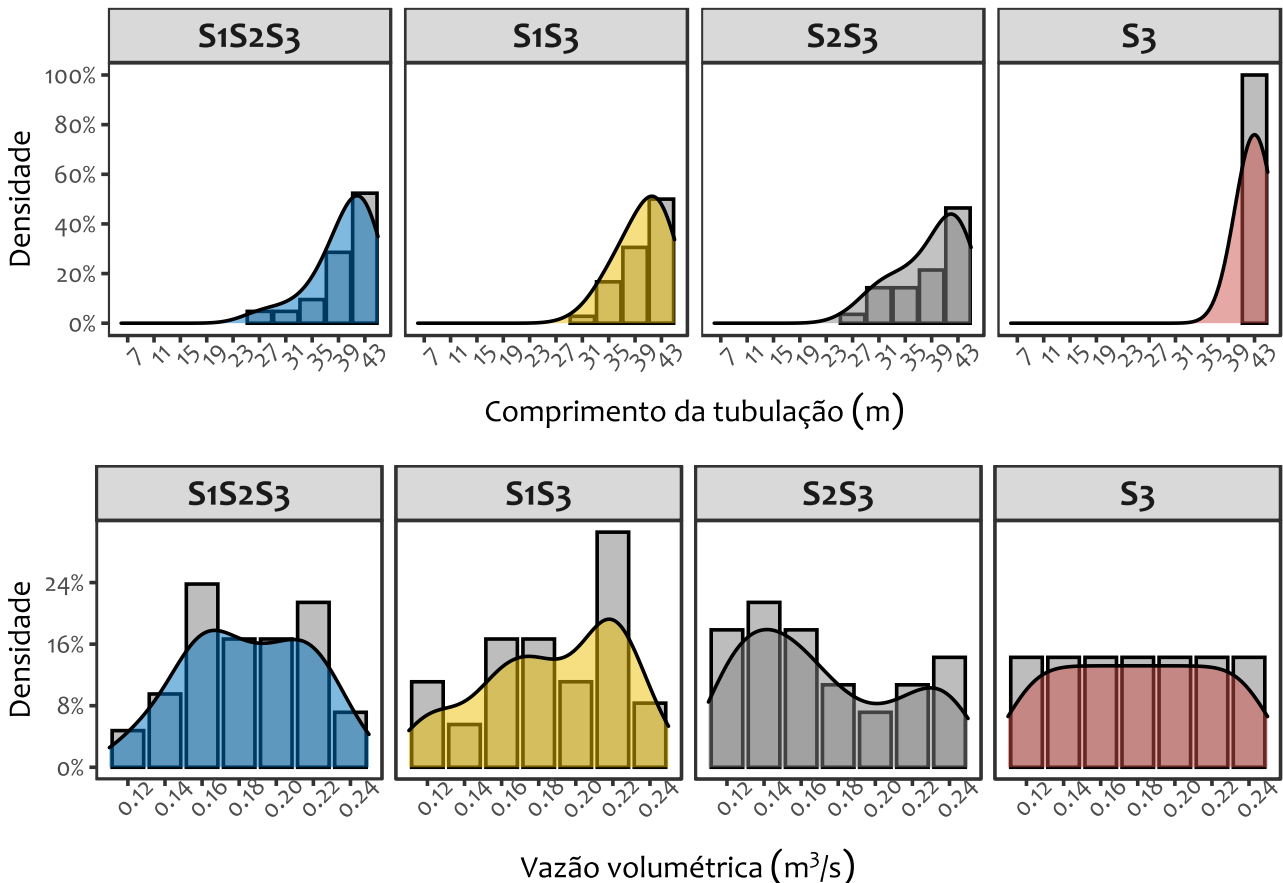
A temperatura de mudança de fase possui clara tendência para um valor otimizado que gera altas densidades de frequência. Para todos os modelos de estratégias, isoladas e combinadas, a temperatura de 23°C apresenta as densidades mais elevadas, sendo 100% dos casos para a estratégia isolada (S2) e quando alterado os parâmetros físicos da parede (S1S2). Quando se é inserido um sistema EAHE, as temperaturas de 21°C e 25°C também se manifestam nos 10% melhores casos, porém em menor escala do que o valor de 23°C.

Em relação a capacidade térmica latente, todos os modelos de estratégias possuem um perfil de função de densidade diferente, sendo que S1S2 possui uma ausência de valores para 27 kJ/kg, com uma tendência de crescimento à medida que se aumenta os valores de capacidade. Já para S1S2S3 os valores se encontram balanceados, com o maior valor de densidade para 91 kJ/kg. O mesmo ocorre para S2S3, porém com valores não balanceados. O maior valor de densidade ocorre novamente para 91 kJ/kg, porém o valor de 51 kJ/kg também obtém o mesmo resultado. Importante notar que para o valor de 27 kJ/kg, não obtém nenhuma repercussão nos resultados.

Análise dos melhores resultados – parâmetros construtivos e operacionais do EAHE

A Figura 55 apresenta a densidade de frequência dos valores de parâmetros construtivos e operacionais do EAHE, por meio de um gráfico de barras, que possui uma função de densidade para visualizar mais adequadamente seu comportamento. Seus valores foram divididos em grupos de modelo de estratégias, isoladas e combinadas, sendo os 10% melhores resultados para cada grupamento.

Figura 55 – Densidade de frequência dos melhores resultados para os parâmetros construtivos e operacionais do EAHE



Fonte: O autor

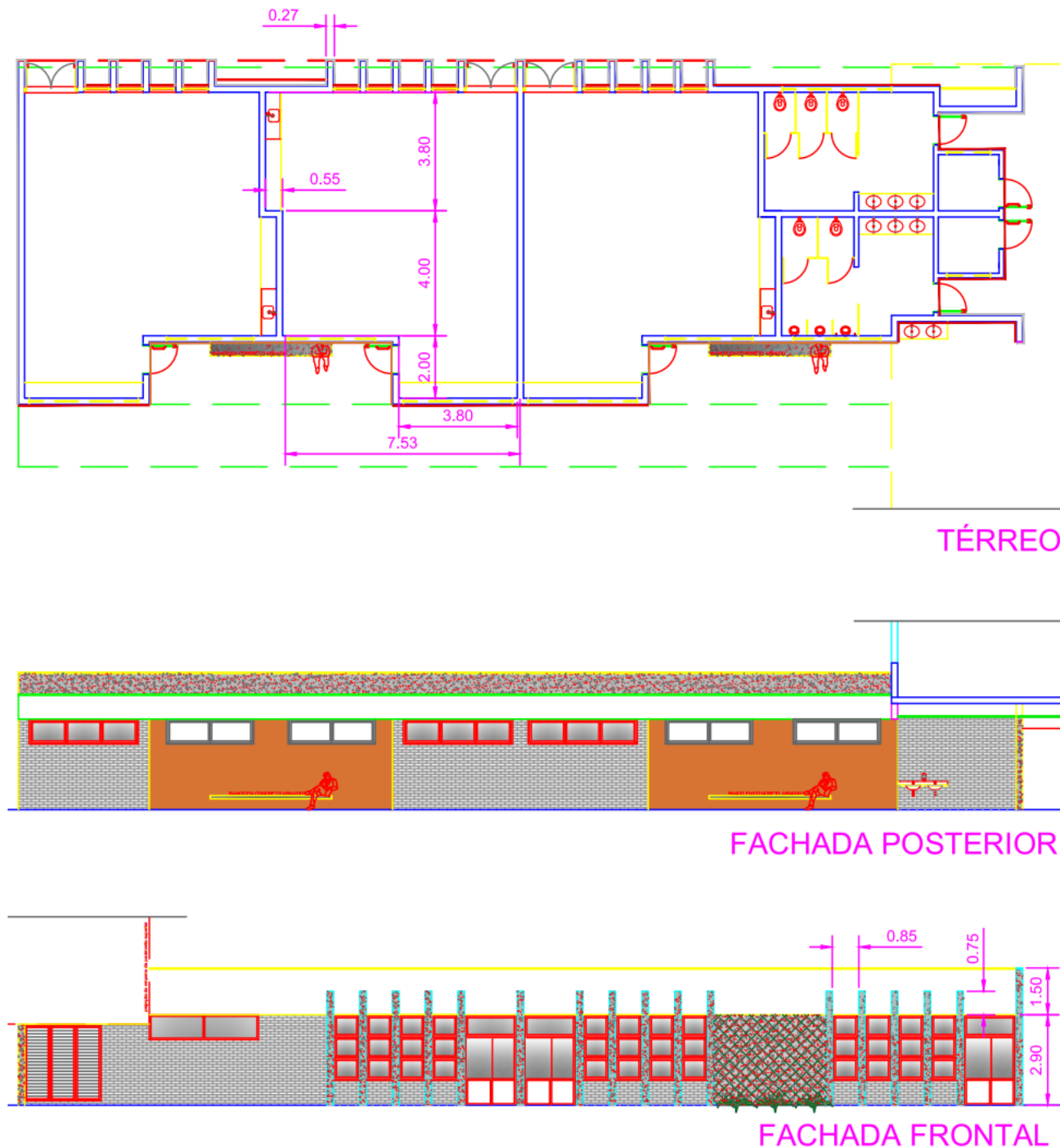
O comprimento da tubulação do EAHE possui tendência de valores visivelmente evidente, sendo maiores densidade de função para maiores valores de comprimento. Para o caso do modelo com a estratégia isolada, 100% dos resultados foram para uma tubulação com 43 metros de comprimento. Tal desempenho não é acompanhada quando se insere outras estratégias ao modelo, porém o valor de 43 metros continua o mais destacado, sendo que, para os outros valores de comprimento, o menor comprimento para se obter resultado é o de 27 metros.

Para o parâmetro de vazão volumétrica do sistema EAHE, obteve-se um perfil de função de densidade balanceado ao centro, sendo que para o modelo com a estratégia isolada, os valores de densidade são o mesmo para todos os valores de vazão. Apenas para a estratégia combinada com variação de parâmetros físicos da parede obteve-se um valor destacado de densidade (0,22 m³/s). Para S1S2S3 e S1S3, percebe-se uma menor densidade de frequência para os valores extremos de vazão volumétrica (0,12 m³/s e 0,24 m³/s). Para S2S3, os valores menores de vazão apresentam maior densidade.

Anexo A – Cotagem de dimensões

Os desenhos técnicos foram produzidos pela CODIN, sendo um projeto de escolas padrão de 5 e 9 salas para o FNDE. A Figura 56 mostra o detalhamento para área pedagógico 2, cotando a sala de aula localizada no centro.

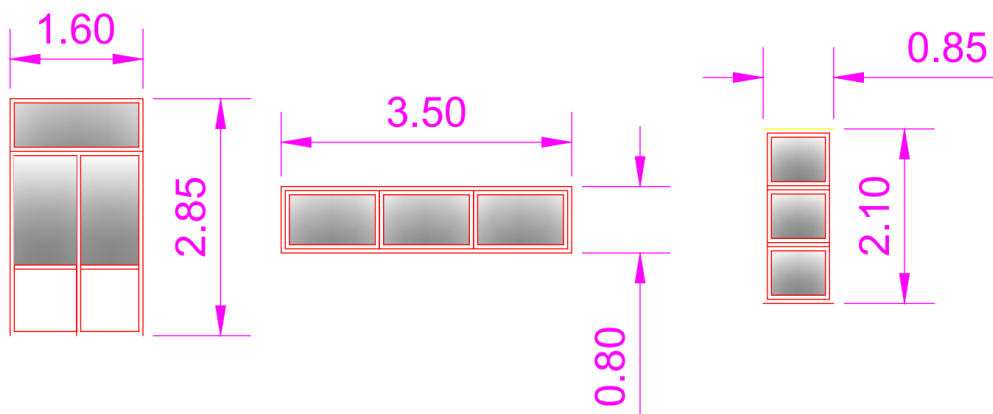
Figura 56 – Dimensionamento do piso da sala de aula 4 (topo), fachada posterior (centro) e dimensionamento da fachada frontal (base)



Fonte: (CODIN, 2016)

A Figura 57 mostra o dimensionamento das janelas e portas da sala de aula

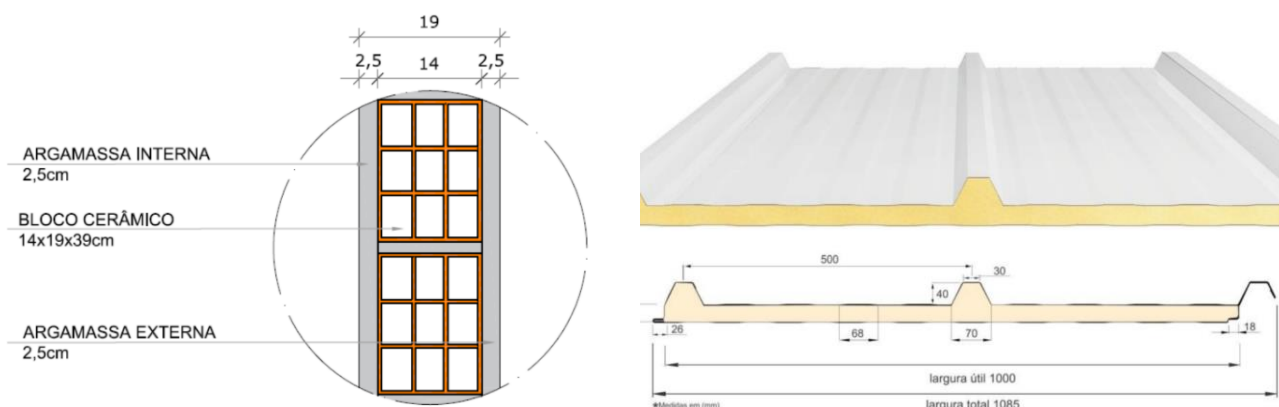
Figura 57 – Dimensionamento da porta e janelas da sala de aula 4



Fonte: (CODIN, 2016)

A Figura 58 mostra o detalhamento dos materiais construtivos da fachada e da cobertura.

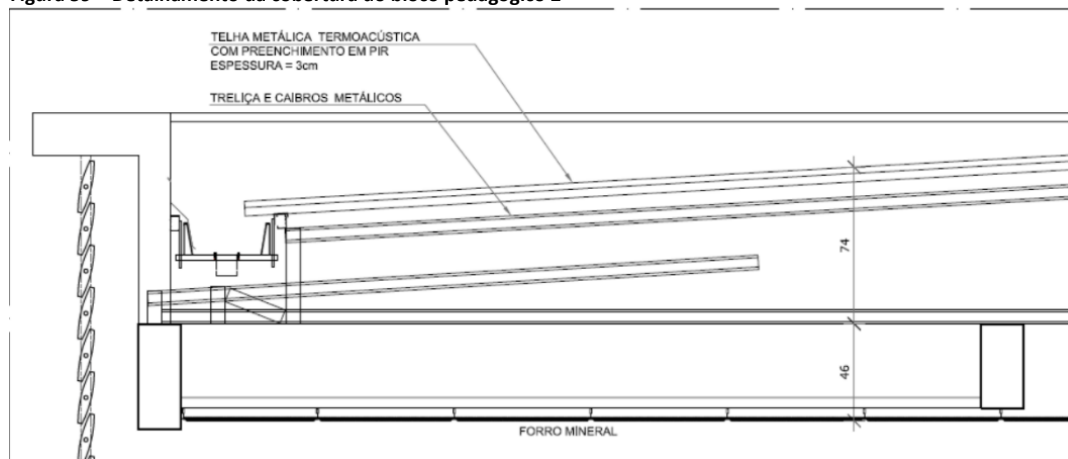
Figura 58 – Tipologia construtiva da parede externa (direita) e da cobertura (esquerda) do bloco pedagógico 2



Fonte: (CODIN, 2016)

A Figura 59 mostra o corte da cobertura e do elemento de sombreamento.

Figura 59 – Detalhamento da cobertura do bloco pedagógico 2



Fonte: (CODIN, 2016)