



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

LARISSA DOS SANTOS BORGES

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TEMPERATURA DO AR EM UM EDIFÍCIO COM
MATERIAIS CONSTRUTIVOS ALTERNATIVOS

ANANINDEUA-PA

2022

LARISSA DOS SANTOS BORGES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TEMPERATURA DO AR EM UM EDIFÍCIO COM
MATERIAIS CONSTRUTIVOS ALTERNATIVOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao *campus* universitário de Ananindeua da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade

ANANINDEUA-PA

2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

D722s dos Santos Borges, Larissa.
Simulação Numérica da Temperatura do Ar em um
Edifício com Materiais Construtivos Alternativos / Larissa dos
Santos Borges. — 2022.
18 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho de Andrade
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Ananindeua, Curso de Ciência e Tecnologia, Ananindeua,
2022.

1. EnergyPlus. 2. Conforto Térmico. 3. Simulação
Computacional. 4. Materiais Alternativos. I. Título.

CDD 621.402

LARISSA DOS SANTOS BORGES

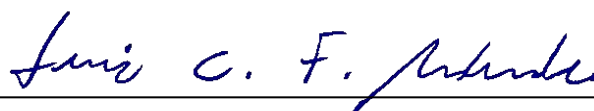
**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TEMPERATURA DO AR EM UM EDIFÍCIO COM
MATERIAIS CONSTRUTIVOS ALTERNATIVOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao *campus* universitário de Ananindeua da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharela em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade

APROVADO EM: 16/12/2022

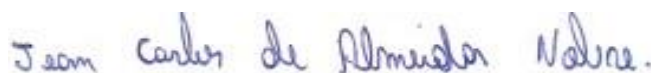
BANCA EXAMINADORA:



Prof. D.Sc. Luiz Cláudio Fialho Andrade
Orientador – FACT/UFPA



B.Sc. David Lohan Pereira de Sousa
Examinador – FACT/UFPA



B.Sc. David Lohan Pereira de Sousa
Examinador – FACT/UFPA

ANANINDEUA-PA

2022

A todas as fontes inesgotáveis de apoio
para mim: meus pais, amigos e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Roseane e ao meu pai Ruben, pelos incentivos e por acreditarem em mim desde sempre.

Ao ensino público, pela oportunidade de ingressar no ensino superior.

A todo corpo docente da Universidade Federal do Pará, por cada aprendizado e desafio proposto, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade pelas – quase sempre – respostas rápidas no *WhastApp* e por me acompanhar nas correções e aperfeiçoamento deste projeto.

Aos meus amigos, sobretudo ao David e ao Jean, pela paciência e companheirismo.

A minha namorada, Marta Souza, por aguentar as minhas crises de ansiedade e por não faltar carinho e suporte ao seu lado. Sem seus encorajamentos, este trabalho não seria possível.

RESUMO

O presente estudo contempla a análise térmica de um prédio habitacional (10x10x3) simulado a partir de materiais alternativos. Dando evidência às variáveis internas e externas, que interferem termicamente em quaisquer tipos de material. A investigação substancial desta pesquisa é observar com maior atenção a temperatura interna do ar no edifício, ou seja, a previsão de sensação térmica para os possíveis frequentadores.

As referências para a simulação foram o ano de 2021 e os dados climáticos da cidade de Belém-PA. Os elementos telha, tijolo, piso, argamassa e porta, foram incorporados utilizando materiais alternativos, enquanto os demais mantiveram o aparato construtivo tradicional.

Ao utilizar o Método de Balanço de Calor (HBM), o *EnergyPlus*, software principal da simulação, opera e manipula os dados referentes ao desempenho termoenergético, a fim de prever os níveis de conforto térmico na edificação simulada. Este estudo não foi elaborado para fins meramente comparativos entre os elementos, o propósito é expender o reflexo do uso de materiais não-convencionais no desempenho térmico de uma estrutura.

Palavras-chave: conforto térmico; método de balanço de calor; *energyplus*; simulação computacional; materiais alternativos.

ABSTRACT

The present study contemplates the thermal analysis of a residential building (10x10x3) simulated from alternative materials. Giving evidence to internal and external variables, which interfere thermally in any type of material. The substantial investigation of this research is to observe with greater attention the internal temperature of the air in the building, that is, the prediction of thermal sensation for the possible visitors.

The references for the simulation were the year 2021 and the climate data for the city of Belém-PA. The tile, brick, floor, mortar and door elements were incorporated using alternative materials, while the others kept the traditional construction apparatus.

By using the Heat Balance Method (HBM), EnergyPlus, the main simulation software, operates and manipulates the data referring to the thermoenergetic performance, in order to predict the levels of thermal comfort in the simulated building. This study was not elaborated for merely comparative purposes between the elements, the purpose is to expend the reflection of the use of non-conventional materials in the thermal performance of a structure.

Keywords: thermal comfort; heat balance method; plus energy; computer simulation; alternative materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do método do balanço de calor (HBM) em uma zona térmica .	16
Figura 2 – Edifício modelado utilizando o <i>software SketchUp Make 2017 v17.5.2555</i>	20
Figura 3 – Relação dos <i>softwares</i>	21
Figura 4 – Aba <i>site</i>	22
Figura 5 – Aba <i>constructions</i>	22
Figura 6 – Aba <i>geometry</i>	23
Figura 7 – Aba <i>output variables</i>	23
Figura 8 – Aba <i>run simulation</i>	23
Figura 9 – Aba <i>results summary</i>	24
Figura 10 – Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido da cidade de Belém-PA....	24
Figura 11 – Radiação solar direta e difusa da cidade de Belém-PA	25
Figura 12 – Resultados da temperatura interna do ar na edificação na cidade de Belém-PA	25
Figura 13 – Mês com menor temperatura na edificação em Belém-PA	26
Figura 14 – Mês com maior temperatura na edificação em Belém-PA	26
Figura 15 – Curva de duração da temperatura na edificação no ano de 2021 em Belém-PA	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Térmicas dos Materiais Alternativos.....	20
--	----

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers</i>
BLAST	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
CTF	Funções de Transferência de Condução
DOE	<i>Department of Energy</i>
HBM	Método de Balanço de Calor
IDF	<i>Input data file</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NR	Norma Regulamentadora
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage Dissatisfied</i>
PPHM	Painéis de Partículas Homogêneas de Madeira
WPC	<i>Wood-Polymer Composite</i>

SUMÁRIO

1	RESUMO	13
2	INTRODUÇÃO.....	13
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1	Conforto Térmico.....	14
3.2	Normas Regulamentadoras	14
3.3	Norma Regulamentadora Brasileira: NR 17 e a Climatização de Ambientes	15
3.4	Método do Balanço de Calor (HBM).....	15
3.5	Simulações Numéricas em Edificações.....	18
4	METODOLOGIA.....	19
4.1	Materiais e Equipamentos.....	20
4.2	Simulação	21
4.2.1	<i>SketchUp</i>	21
4.2.2	<i>OpenStudio</i>	21
4.2.3	<i>EnergyPlus</i>	21
4.2.4	Abas Principais da Simulação.....	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
	REFERÊNCIAS	28

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA TEMPERATURA DO AR EM UM EDIFÍCIO COM MATERIAIS CONSTRUTIVOS ALTERNATIVOS

Larissa dos Santos Borges (Universidade Federal do Pará)
Raimundo Santos Pinheiro (Universidade Federal do Pará)
David Lohan Pereira de Sousa (Universidade Federal do Pará)
Jean Carlos de Almeida Nobre (Universidade Federal do Pará)
Luiz Claudio Fialho Andrade (Universidade Federal do Pará)

Resumo

A partir da investigação da metodologia de cálculo utilizada no *software EnergyPlus* (Método do Balanço de Calor - HBM), esta pesquisa tem como objetivo realizar simulações numéricas sobre desempenho térmico estrutural para analisar o conforto térmico de um edifício que utiliza materiais construtivos alternativos, ou seja, que fogem do senso comum, normalmente são materiais feitos de compósitos. A partir disso, foram determinadas as características do edifício, como os elementos construtivos munidos de suas propriedades térmicas. Para o prosseguimento da análise foram determinadas variáveis de saída. O arquivo climático utilizado foi o da cidade de Belém do Pará no formato SWERA (BRA_Belem-Val.de.Caes.821930_SWERA), representando todas as épocas do ano de 2021. As ferramentas utilizadas nesta simulação foram os *softwares SketchUp Make 2017, OpenStudio e EnergyPlus*, que apresentaram suas atribuições individuais no decorrer do procedimento. Com os resultados gerados pela simulação numérica foi possível analisar as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, radiação solar direta e radiação solar difusa, juntamente a resultados estatísticos gerados pelo *EnergyPlus* exibindo a temperatura interna do ar média, mínima, máxima e desvio padrão (grau de dispersão de um conjunto de dados) na edificação estudada, em seguida, é feita a análise do mês mais frio e o mês mais quente e a curva de duração anual que mostra a média da temperatura do ar na edificação em relação às horas totais do ano de 2021 onde é possível verificar a representatividade em “%” que a edificação está dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma ISO 9241/2011.

Palavras-chave: *EnergyPlus*. Materiais Alternativos. Conforto Térmico.

Introdução

A presente pesquisa visa analisar termicamente uma estrutura habitacional com materiais alternativos idealizada, levando em consideração variáveis térmicas internas (material da estrutura e fontes internas de calor) e externas (radiação solar direta e difusa, temperatura de bulbo seco e úmido) que interferem termicamente em qualquer tipo de material. A análise principal deste estudo é focada na temperatura interna do ar na edificação que é de fato a sensação térmica sentida por possíveis frequentadores.

A pesquisa é feita no ano de 2021 com dados climáticos da cidade de Belém-Pa, localizada na região Norte do Brasil com um clima denominado Equatorial, onde a maior parte do período anual tem características de verão, com a menor parte do período de meses com mais chuvas, e características de inverno (inverno amazônico). Utiliza-se nesta pesquisa os seguintes materiais construtivos alternativos: telha de PPHM (painéis de partículas homogêneas de madeira), tijolo adobe (construção em terra crua), piso de gesso acartonado, argamassa com vermiculita, porta WPC (composto de madeira-polímero). Os demais materiais construtivos são tradicionais (reboco, janela de vidro e laje de concreto).

O uso de novos materiais de construção é desejável ao implicar na reutilização de materiais que podem prejudicar o meio ambiente. adicionalmente, a carência de matéria-prima tradicional também pode ser contornada pelo uso de matéria-prima alternativa.

Existem diversas normas de climatização e uma delas é a ISO 9241/2011 que estipula uma temperatura padrão que edificações devem apresentar para fins de bem-estar térmico de pessoas.

Neste trabalho foram usados três *softwares* livres: *SketchUp Make*, *OpenStudio* e *EnergyPlus*.

Revisão da literatura

Conforto Térmico

É uma circunstância da mente, que indica o bem-estar com a temperatura do ambiente em que a pessoa se encontra. Uma pessoa em conforto térmico não se sente com calor ou com frio, essa é a condição para que esse bem-estar térmico seja obtido. A troca de calor do indivíduo com a zona térmica ocorre através da condução, convecção, radiação, e transferência de massa. (FANGER, 1970).

O conforto térmico é estabelecido pelo efeito causado por alguns fatores: umidade do ar, velocidade do ar, movimentação pessoal, radiação térmica, condição de vestimenta e temperatura (HALAWA; VAN HOOFF; SOEBARTO, 2014).

Normas Regulamentadoras

As principais normas regulamentadoras internacionais foram desenvolvidas pela ISO (*International Organization for Standardization*) e pela ASHRAE (*American*

Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.), com objetivo de determinar medidas padrões para análise do desempenho termoenergético, onde seus fundamentos originam-se de experimentos em câmaras climatizadas, especialmente aqueles praticados por Fanger (1970).

ISO 7730 (2005): apresenta um método para a previsão da sensação térmica e grau de desconforto das pessoas em ambientes térmicos moderados; determinação dos índices: voto médio (PMV), pessoas insatisfeitas (PPD) e especificações das condições de conforto térmico;

ISO 10551 (1995): ergonomia do ambiente térmico: analisa a intervenção do ambiente térmico usando escalas de julgamento subjetivo; proporciona um composto de escalas de julgamento de percepção, avaliação, preferência e tolerância do ambiente térmico;

ISO 9241 (2011): indica a temperatura ideal, no verão entre 20 °C e 24 °C e no inverno entre 23 °C e 26 °C, com umidade relativa do ar entre 40% e 80%;

ASHRAE Standard 55 (2017): Determina condições para ambientes térmicos aceitáveis e destina-se ao uso em projeto, operação e comissionamento de edifícios e outros espaços ocupados. Essa norma inclui informações do isolamento das vestimentas, localizações e medições dos períodos, baseada nos estudos de Fanger (1970).

Norma Regulamentadora Brasileira: NR 17 e a Climatização de Ambientes

Esta norma trata da ergonomia de funcionários e determina parâmetros para aumentar o conforto térmico de ambientes, melhorando a segurança das atividades; declara que o índice de temperatura efetiva deve ficar entre 20 °C e 23 °C, velocidade do ar não acima de 0,75 m/s e umidade do ar não inferior a 40%.

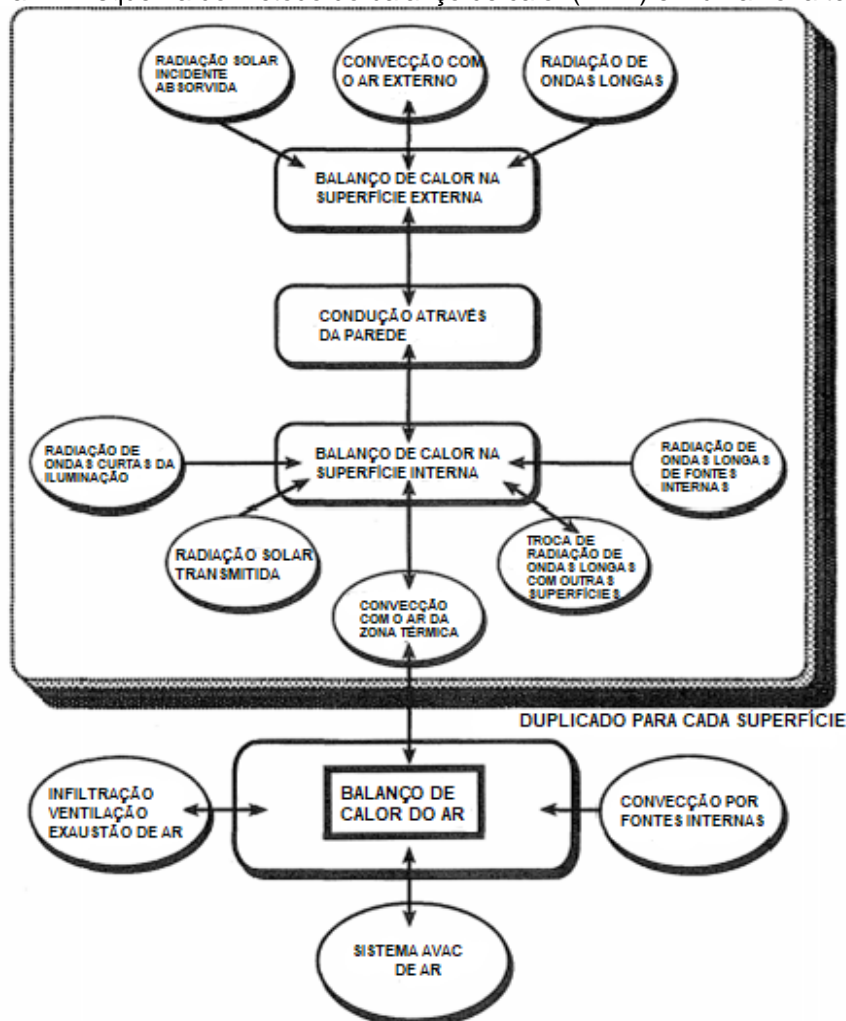
Método do Balanço de Calor (HBM)

O Método do Balanço de Calor (HBM), está entre os mais avançados e precisos para a obtenção da carga térmica em edificações (ASHRAE, 2013). Sendo o método de cálculo utilizado pelo *software EnergyPlus*. Baseado em um balanço de energia para as superfícies do local desejado e um balanço de energia para o ar do interior. A partir desse balanço, serão computados os ganhos de calor que efetivamente converteram-se em carga térmica.

Esse método garante que o fluxo energético em cada zona térmica seja balanceado, exigindo a participação de uma gama de equações para o cálculo do balanço energético para o ar no interior das zonas, nas partes superficiais internas e externas dos elementos da construção (LOPES, 2013).

A Figura 1, mostra o esquema do HBM em uma zona.

Figura 1 – Esquema do método do balanço de calor (HBM) em uma zona térmica.



Fonte: Adaptado e traduzido de Pedersen; Fisher; Liesen (1997).

A Equação 1 determina o balanço de calor na região superficial externa. A radiação solar de onda curta, direta e difusa, sofre interferência da posição geográfica do prédio, das especificidades dos materiais que constituem a envoltória e das condições climáticas. A radiação de onda longa resulta por meio das trocas de calor por radiação entre superfícies de entorno do edifício e o céu (MCQUISTON; PARKER; SPITLER, 2005).

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} + q''_{ko} = 0 \quad (1)$$

Onde:

$q''_{\alpha sol}$: fluxo de radiação solar direta e difusa assimilada [W/m²];

q''_{LWR} : fluxo de calor por radiação de onda longa entre o ar e os arredores [W/m²];

q''_{conv} : fluxo de troca de calor por convecção com o ar externo [W/m²];

q''_{ko} : fluxo de calor por condução (parede) [W/m²].

A parte fundamental do HBM é o balanço de calor que compreende as regiões internas das zonas térmicas (PEDERSEN; FISHER; LIESEN, 1997).

As radiações de ondas longas e de ondas curtas são de extrema importância, tal como a convecção interna e condução. A relação para cada face interna está na Equação 2.

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2)$$

Onde:

q''_{LWX} : fluxo líquido de radiação através das superfícies internas [W/m²];

q''_{SW} : fluxo líquido de radiação das lâmpadas para superfícies [W/m²];

q''_{LWS} : fluxo radiante dos equipamentos [W/m²];

q''_{ki} : fluxo de condução mediante a parede [W/m²];

q''_{sol} : fluxo de radiação solar absorvida e transmitida [W/m²];

q''_{conv} : fluxo de calor convectivo para o ar interno [W/m²].

A transferência de calor por condução na parede é modelada utilizando funções de transferência de condução (CTF), que relacionam os fluxos de calor condutivo às temperaturas da superfície atual, passada e também, aos fluxos de calor passados (PEDERSEN; FISHER; LIESEN, 1997).

Tomando uma equação linear com coeficientes constantes, pode-se facilmente calcular a transferência de calor de um elemento. A partir de 9 coeficientes determinados uma vez para cada espécie de edifício, torna-se possível fazer o cálculo dessa transferência (ENERGYPLUS, 2012).

As Equações 3 e 4 mostram as relações algébricas ordinariamente empregadas para obter a condução através do CTF.

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (3)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (4)$$

Onde:

X_j : coeficiente externo CTF, $j = 0, 1, \dots, nz$,

Y_i : coeficiente de transição CTF, $j = 0, 1, \dots, nz$,

Z_j : coeficiente interno CTF, $j = 0, 1, \dots, nz$,

Φ_j : coeficiente de fluxo CTF, $j = 1, 2, \dots, nq$,

T_i : temperatura da superfície interna;

T_o : temperatura da superfície externa;

q''_{ko} : fluxo de condução na superfície externa;

q''_{ki} : fluxo de condução na superfície interna.

As representações, nz e nq , são variáveis influenciadas pela constituição estrutural das paredes e ainda, do método empregado no cálculo das CTF. A determinação dessas variáveis normalmente é feita no intuito de simplificar o cálculo computacional. As CTF são uma série de coeficientes que caracterizam os ganhos de calor nas faces da envoltória do edifício.

Simulações Numéricas em Edificações

A simulação numérica se baseia em dados de entrada disponibilizados pelo usuário para realizar os cálculos de balanço energético e fluxo térmico em cada superfície e componente do edifício. Os itens que identificam estes dados são: envoltória e composição do edifício; informações de utilização e condições externas.

Sousa (2022), realizou simulações numéricas para analisar o desempenho térmico em um edifício institucional da Universidade Federal do Pará, localizado no município de Ananindeua-PA. A ferramenta de simulação computacional utilizada para o cálculo do conforto térmico e consumo energético neste trabalho foi o *software EnergyPlus v9.6.0*. Os resultados obtidos para o conforto térmico foram que os ambientes simulados apresentaram temperaturas entre 23,7°C e 33,3°C, com

estes dados foi possível verificar a quantidade de horas e representatividade (%) anual em que os ambientes estão dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma ISO 9241/2011 e da NR 17, o estudo se mostrou bastante coerente com as condições externas referentes a cidade de Belém-PA.

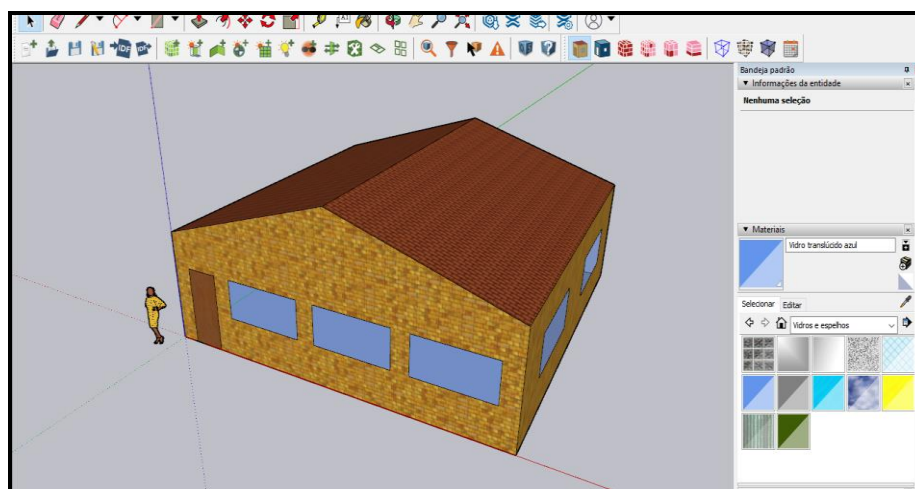
Nobre (2022), utilizou os *softwares EnergyPlus, OpenStudio e SketchUp* para simular e analisar o nível de temperatura do ar em um auditório da Universidade Federal do Pará, localizado em Ananindeua-PA que está em fase de construção, com variáveis meteorológicas, estruturais e fisiológicas. A análise de desempenho térmico do auditório foi realizada no ano de 2021, para zonas térmicas de cada mês do ano, verificando e indicando a época do ano com maiores e menores temperaturas do ar no auditório, utilizando como base de dados arquivos climáticos de Belém-PA. Os resultados obtidos para o desempenho térmico estrutural, no ano analisado, foram retirados de duas simulações com o *software*, na primeira simulação foram adotadas somente variáveis meteorológicas e estruturais; na segunda foram adotadas variáveis meteorológicas, estruturais e fisiológicas, verificando a variação da temperatura no auditório com a quantidade máxima de pessoas no local. Por fim, foram realizadas análises de bem-estar térmico do ambiente com a ISO 9241/2011, verificando se o auditório está confortável termicamente para seus possíveis frequentadores. As zonas térmicas do auditório demonstradas pelo *EnergyPlus* apresentaram temperaturas para o ano de 2021 de 23,78°C até 32,6°C, com uma média de 27,83°C e com um desvio padrão de 1,75°C.

Metodologia

Para a análise do desempenho térmico do edifício, dados climáticos e de propriedades térmicas dos materiais foram inseridos no *software*, e com isso o *EnergyPlus* cria zonas térmicas para os ambientes do edifício, então, são feitas comparações dos resultados com os parâmetros estabelecidos pela norma ISO 9241/2011.

A Figura 2 mostra o modelo do edifício simulado em formato 3D, que foi desenhado utilizando o *software SketchUp Make*, que junto com o *software OpenStudio* geram um arquivo com a extensão “.idf” que é utilizado na simulação por meio do *software EnergyPlus*.

Figura 2 – Edifício modelado utilizando o software *SketchUp Make 2017 v17.5.2555*.



Fonte: Próprios Autores (2022).

Materiais e Equipamentos

Na execução desta pesquisa, foram utilizados os softwares: *SketchUp Make 2017 v17.5.2555*, *OpenStudio v3.3.0 (Plugin)* e *EnergyPlus v9.6.0*.

As dimensões do edifício proposto na simulação computacional são: 10 m de comprimento, 10 m de largura e 3 m de altura, com uma área total de 100 m².

Os materiais e suas características térmicas presentes na edificação estão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades Térmicas dos Materiais Alternativos

Material	Espessura (m)	Condutividade de (W/mK)	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (J/kgK)
Telha de PPHM (Cp3)	0,02	0,213	898,42	920*
Tijolo Adobe	0,297	0,55	1341,05	920*
Piso de Gesso Acartonado	0,0125	0,35	750	840
Argamassa com Vermiculita	0,015	0,24	686,4	1230
Porta WPC	0,025	0,18	250	1848,96
Reboco	0,025	1,15	1800	1000
Janela de vidro	0,003	0,9	-	-
Vidro comum	0,01	1,0	2500	840
Laje de Concreto	0,2	1,75	2200	1000

Fonte: a) telha de PPHM (Cp 3): POLETO, Sabrina Fernanda Sartório (2020); b) bloco de tijolo de terra crua (Adobe 2): DAL SOGLIO, Carolina Rodrigues *et al* (2018); c) e d) gesso acartonado e argamassa com vermiculita: BALDISSERA, Eduarda; BARROS, Ilana Maria da Silva (2020); e) porta WPC: CASTRO, J. F (2010); f) reboco, janela de vidro, vidro comum e laje de concreto: Fonte: ABNT Projeto 02:135.07-001/2. Rio de Janeiro (2003).

Simulação

SketchUp

Este *software* trabalha com ferramentas de modelamento estrutural tridimensional e foi desenvolvido pela *At Last Software* e posteriormente adquirido pela empresa *Google*. O *software*, em suas versões comerciais, é pago, no entanto a versão *Make* é gratuita e também conta com a versão *online*, o *SketchUp for web*.

OpenStudio

Consiste em um leque de ferramentas multiplataformas fornecidas pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) que permite fazer a modelagem de um edifício utilizando o composto dos *softwares* *SketchUp* e *EnergyPlus*, dentre outros dispositivos computacionais que dedicam-se à simulação.

EnergyPlus

Uma das principais ferramentas de simulação termoenergética, *EnergyPlus* foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, baseado em dois outros *softwares*, o BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) utilizado em desempenho energético e o DOE-2 (*Department of Energy software*), utilizado em desempenho térmico (DOE, 2013). O *EnergyPlus* permite simulações integradas de cargas térmicas e sistemas em regime transiente (CRAWLEY, 2001).

A junção desses três *softwares* é de extrema importância para o desenvolvimento da pesquisa relacionada, pode-se notar que o *software* principal (*EnergyPlus*) é vinculado ao *OpenStudio* assim como o *SketchUp*, sistematizando em um único *software* a entrega e saída de dados, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Relação dos *softwares*.



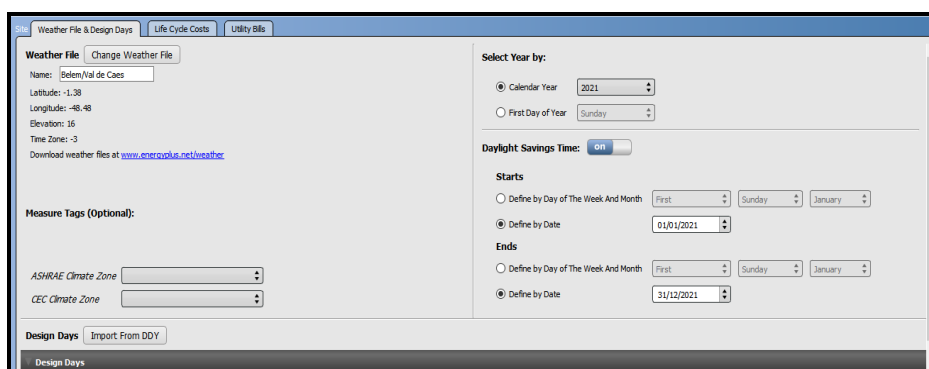
Fonte: *EnergyPlus*, *OpenStudio* e *SketchUp* (2022).

Abas Principais da Simulação

Com intuito de gerar uma visão geral, sobre o funcionamento dos *softwares* utilizados no desenvolvimento deste estudo segue o tutorial.

Na Aba *site* (Figura 4) adiciona-se o arquivo climático da região de Belém-Pa, referente a dados da temperatura do ar, radiação solar, entre outras variáveis térmicas, e também define-se o ano e os meses a serem estudados.

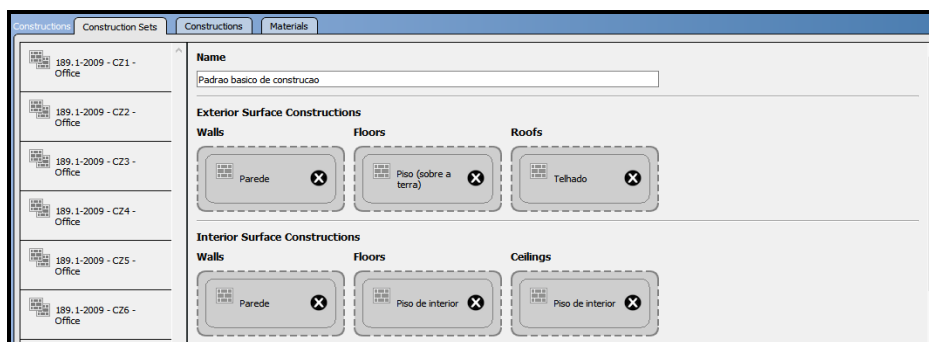
Figura 4 - Aba *site*.



Fonte: Próprios Autores (2022).

Na aba *constructions* (Figura 5) adiciona-se dados referentes a construção do edifício, dados relacionados ao tipo de material, suas características térmicas e métricas, para então configurar itens específicos do edifício e qual deles está em contato com determinado espaço do ambiente, de forma a permitir montar o padrão construtivo da edificação dentro do *OpenStudio*.

Figura 5 - Aba *constructions*.

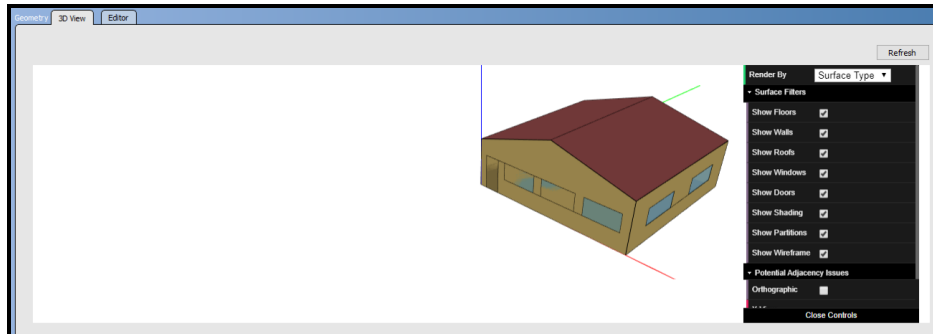


Fonte: Próprios Autores (2022).

Na aba *geometry* (Figura 6), pode-se visualizar o desenho arquitetônico feito no *SketchUp*, além de poder identificar as faces do edifício e nomeá-las para uma

melhor análise das zonas térmicas. Esta aba permite uma visão ampla do que está sendo feito no *software* referente ao desenho arquitetônico.

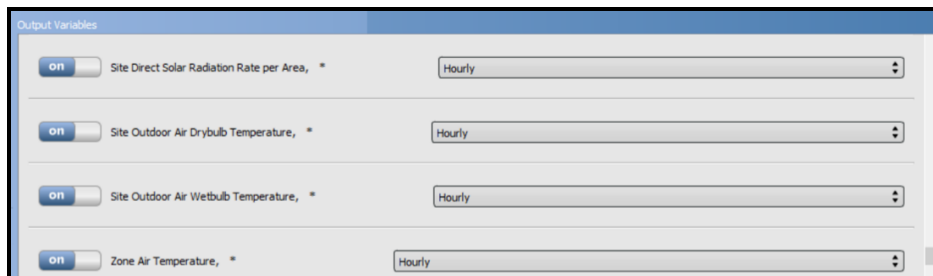
Figura 6 - Aba *geometry*.



Fonte: Próprios Autores (2022).

Na Figura 7 (aba *output variables*), escolhem-se os resultados a serem gerados pelo *software*, onde foram escolhidos resultados sobre a radiação solar direta e difusa e temperaturas externas e internas do ar na edificação.

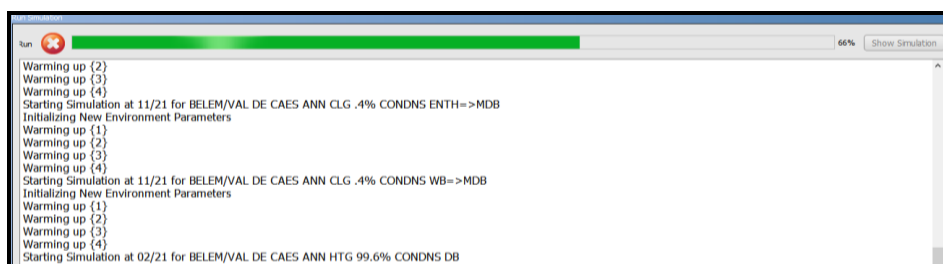
Figura 7 - Aba *output variables*.



Fonte: Próprios Autores (2022).

Nas Figuras 8 e 9, tem-se, respectivamente, a parte inicial da simulação, e a parte final, onde são mostrados os resultados que foram convertidos em gráficos.

Figura 8 - Aba *run simulation*.



Fonte: Próprios Autores (2022).

Figura 9 - Aba *results summary*.

Reports: EnergyPlus Results Refresh Open D/View for (Detailed) Reports

Program Version: EnergyPlus, Version 9.6.0-4b123cf80f, YMD=2022.02.22 18:35

Tabular Output Report in Format: HTML

Building: Predio de auditorio padrao

Environment: RUN PERIOD 1 ** Belém/Val de Caes - BRA SWERA WMO#-821930

Simulation Timestamp: 2022-02-22 18:35:28

Report: Annual Building Utility Performance Summary

For: Entire Facility

Timestamp: 2022-02-22 18:35:28

Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

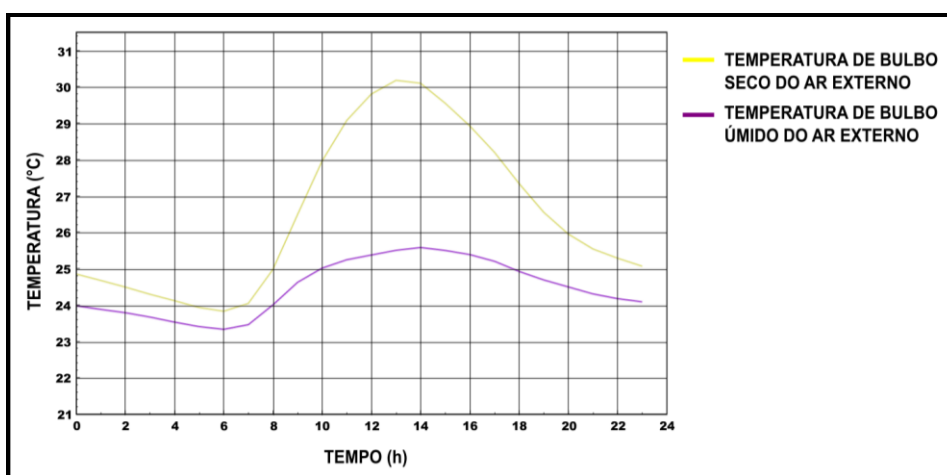
	Total Energy [GJ]	Energy Per Total Building Area [MJ/m ²]	Energy Per Conditioned Building Area [MJ/m ²]
Total Site Energy	61.69	254.65	
Net Site Energy	61.69	254.65	
Total Source Energy	195.37	806.46	
Net Source Energy	195.37	806.46	

Fonte: Próprios Autores (2022).

Resultados e Discussões

A Figura 10 ilustra as temperaturas em °C do ar seco e úmido expresso pelo próprio arquivo climático da cidade de Belém-PA. As temperaturas de bulbo úmido apresentam uma máxima de 28,64 °C, uma mínima de 19,35 °C, uma média anual de 24,45 °C e um desvio padrão de 1 °C. A temperatura de bulbo seco apresenta uma máxima de 35,54 °C, uma mínima de 21,91 °C, uma média anual de 26,46 °C e um desvio padrão de 2,53 °C.

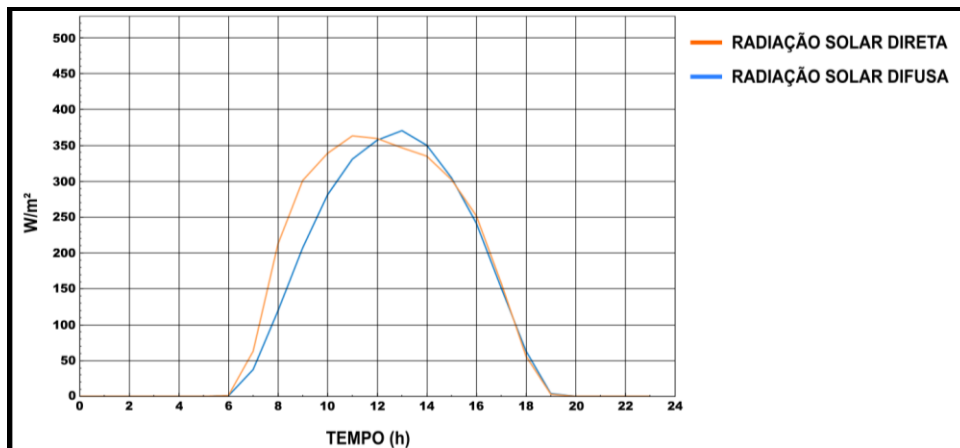
Figura 10 – Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido da cidade de Belém-PA.



Fonte: Próprios Autores (2022).

A Figura 11 ilustra as radiações solar direta e difusa em W/m² durante o ano de 2021 em Belém-PA. A média anual da radiação solar direta foi de 128,94 W/m² e a média anual da radiação solar difusa foi de 117,19 W/m².

Figura 11 – Radiação solar direta e difusa da cidade de Belém-PA.



Fonte: Próprios Autores (2022).

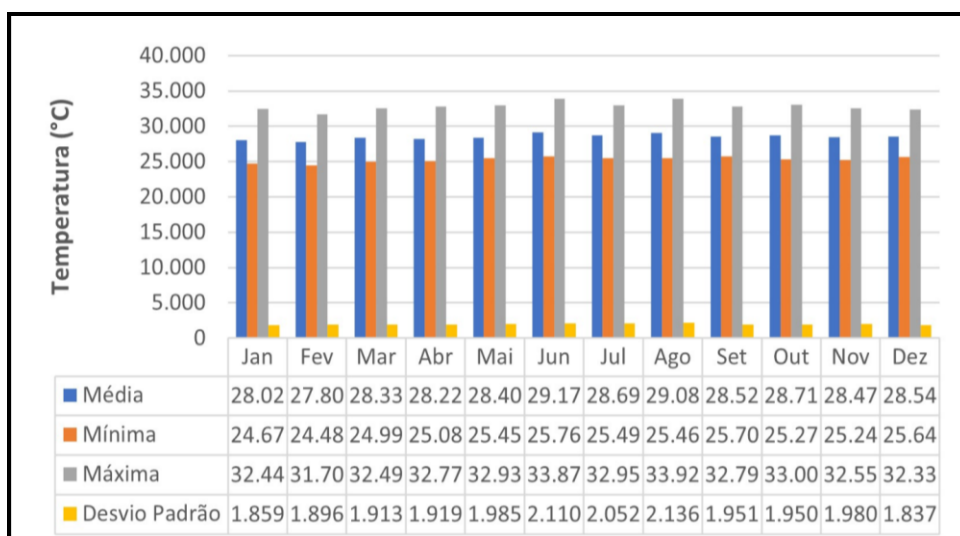
A Figura 12 ilustra os resultados da simulação para a temperatura interna do ar na edificação expressa em °C. Gerando resultados referentes às temperaturas mínimas, máximas, médias e desvios padrões para cada mês do ano de 2021.

Os meses que apresentaram menores temperaturas internas do ar na edificação foram: janeiro, fevereiro e março.

Os meses que apresentaram maiores temperaturas internas do ar na edificação foram: junho, julho e outubro.

A edificação apresenta anualmente uma temperatura interna do ar com uma máxima de 34,08 °C, mínima de 24,43 °C, média anual de 28,5 °C, e um desvio padrão de 2 °C.

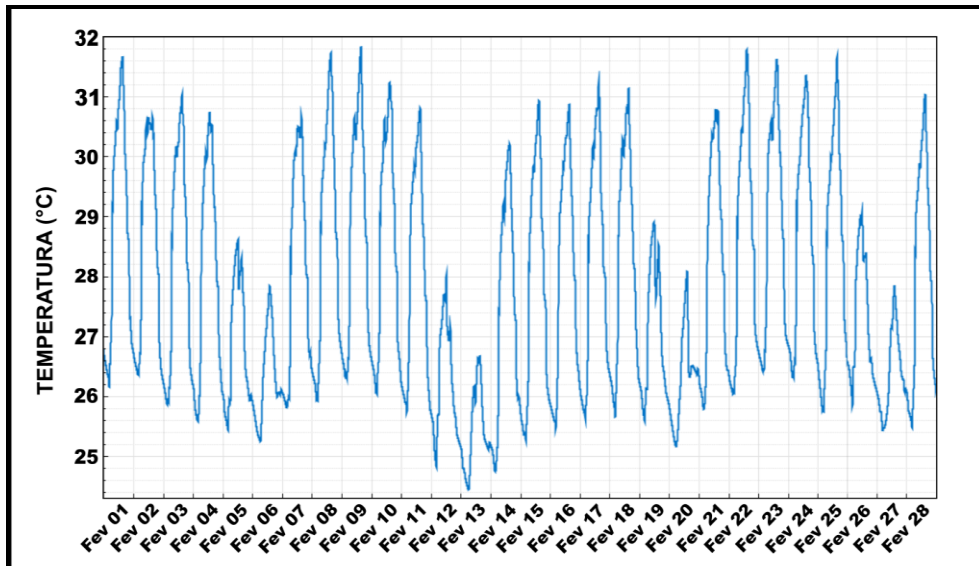
Figura 12 – Resultados da temperatura interna do ar na edificação na cidade de Belém-PA.



Fonte: Próprios Autores (2022).

A Figura 13 mostra que a menor temperatura do ar na edificação no ano de 2021 foi no mês de fevereiro, com uma temperatura mínima de 24,48 °C, uma máxima de 31,70 °C, uma média de 27.80 °C e um desvio padrão de 1.89 °C.

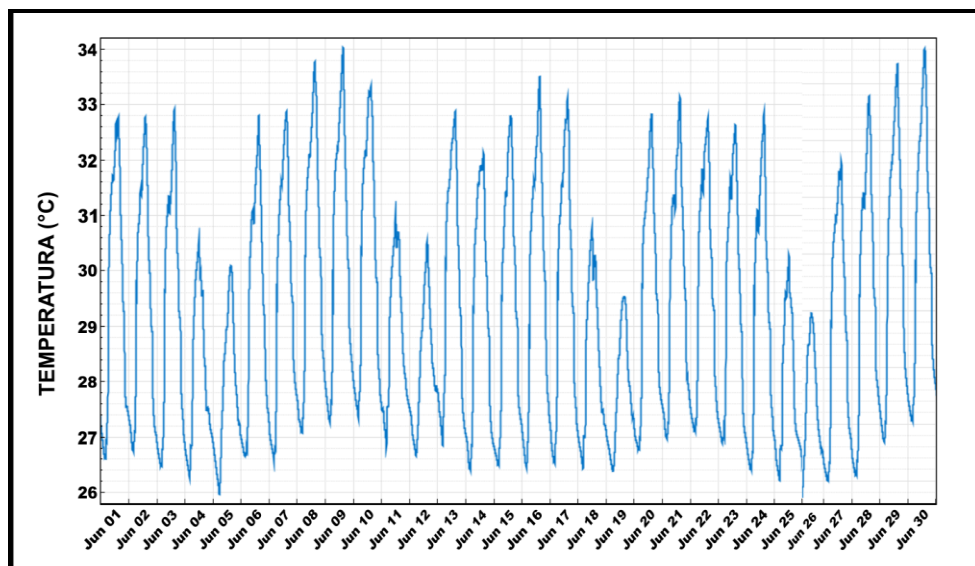
Figura 13 – Mês com menor temperatura na edificação em Belém-PA.



Fonte: Próprios Autores (2022).

A Figura 14 ilustra o mês com a maior temperatura do ar na edificação, o mês de junho, que apresentou uma temperatura mínima de 25,76 °C, uma máxima de 33,87 °C, uma média de 29,17 °C e um desvio padrão de 2,11 °C.

Figura 14 – Mês com maior temperatura na edificação em Belém-PA.



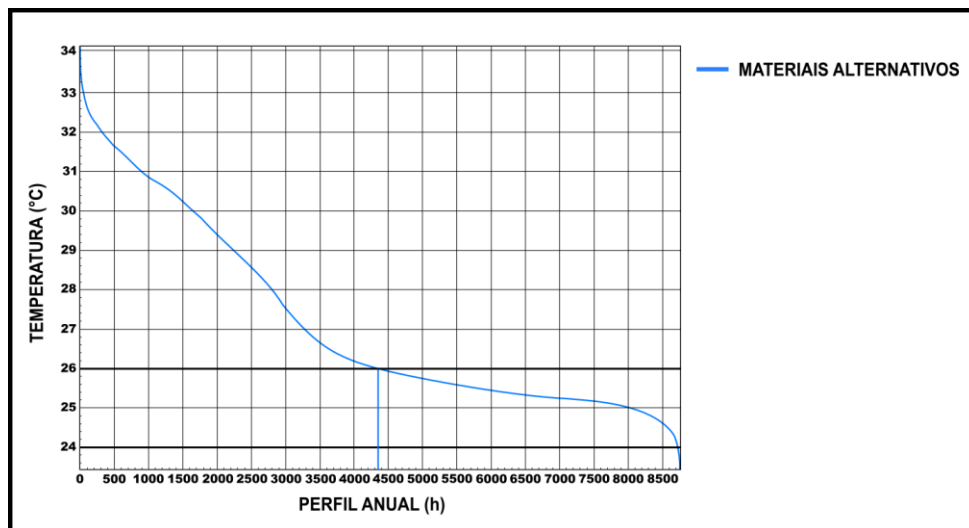
Fonte: Próprios Autores (2022).

Na Figura 15 tem-se a curva de duração do ano de 2021 para 8.760 horas, onde destaca-se o número de horas anuais em que a temperatura da edificação esteve dentro dos parâmetros térmicos de conforto da ISO 9241/2011.

Percebe-se que a temperatura esteve igual ou superior a 26 °C de 0 horas até 4.350 horas, ou seja, esse período de horas anuais está fora dos padrões térmicos da ISO 9241/2011. A partir de 4.350 horas até 8.700 horas a temperatura do edifício está entre 24 °C e 26 °C, logo, dentro dos parâmetros térmicos da ISO 9241/2011.

Com isso, nota-se que 50,35 % da temperatura da edificação está fora dos padrões térmicos e 49,65 % da temperatura da edificação está dentro dos padrões de conforto térmico.

Figura 15 – Curva de duração da temperatura na edificação no ano de 2021 em Belém-PA.



Fonte: Próprios Autores (2022).

Considerações finais

O objetivo desta pesquisa foi demonstrar por meio da investigação da metodologia de cálculo utilizada no *software EnergyPlus* (Método do Balanço de Calor - HBM) a possibilidade de simular o comportamento térmico de um edifício que utiliza elementos construtivos alternativos.

Para reduzir o desconforto térmico de um edifício, algumas ações podem ser tomadas, entre elas a utilização de materiais alternativos.

Os materiais empregados na construção do edifício foram determinados através de pesquisas de desenvolvimento de materiais alternativos, tendo em mãos as informações necessárias, o edifício foi modelado através do *software SketchUp*

Make 2017 v17.5.2555, o arquivo climático foi inserido e os elementos construtivos foram criados e configurados no *software OpenStudio v3.3.0*, por fim, a simulação foi feita via *software EnergyPlus v9.6.0*.

A utilização dos elementos construtivos alternativos: telhas, tijolos, piso, argamassa e portas (que possuem propriedades térmicas mais favoráveis ao conforto térmico, em comparação com materiais tradicionais) proporcionou para o edifício simulado um período considerável (49,65 %) dentro dos parâmetros de conforto térmico estabelecidos pela ISO 9241/2011, NR17 e demais normas regulamentadoras descritas no estudo. É fundamental fazer uma análise de custo x benefício demonstrando que o investimento realizado será compensado pelo isolamento térmico.

Com os resultados obtidos foi possível analisar as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar externo, as radiações solar direta e difusa, dados estatísticos exibindo temperatura média, mínima, máxima e desvio padrão, mês mais frio e mês mais quente resultantes da simulação, curva de duração que mostra a média da temperatura do ambiente em relação às horas de um ano onde é possível verificar o percentual em que os ambientes estão dentro dos parâmetros estabelecidos nas normas regulamentadoras descritas no estudo.

Este estudo demonstra que o uso de *softwares* de simulação termoenergética é útil na fase de planejamento para melhorar o desempenho termoenergético de edifícios.

Referências

ANSI/ASHRAE. **Standard 55**, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA, USA: American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. ASHRAE, 2017.

ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, SI edition. ASHRAE, Atlanta, GA e. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NR 17**: Ergonomia: ENIT – MTE - informação e documentação. Portaria GM nº 3.214, de 08 de junho de 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto 02:135.07-001/2**: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BALDISSERA, Eduarda; LOVATO, Patrícia. ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMA DE VEDAÇÃO EM ALVENARIA DE BLOCOS DE CONCRETO EM ATENDIMENTO À NBR 15575. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, p. 1-8, 2020.

BARROS, Ilana Maria da Silva. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. 2018. Dissertação de Mestrado. Brasil.

CASTRO, J. F. Diseño de un molde para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa PLASMACO. **Diseño de un molde para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plástica en la empresa PLASMACO**, 2010.

CRAWLEY, Drury B. et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and buildings**, v. 33, n. 4, p. 319-331, 2001.

DAL SOGLIO, Carolina Rodrigues et al. Avaliação das propriedades térmicas de tijolos de terra crua (adobes). **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, p. 1124-1130, 2018.

DOE. **EnergyPlus Version 8.6 Documentation: Getting Started**. US Department of Energy, 2013.

ENERGYPLUS v9.6.0. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

ENERGYPLUS™. **"The Reference to EnergyPlus Calculations"**. EnergyPlus Engineering Reference. US Department of Energy, October, 2012.

FANGER, P.O., **"Thermal Comfort"**, McGraw-Hill, New York. 1970.

HALAWA, Edward; VAN HOOFF, Joost; SOEBARTO, Veronica. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control - A critical overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 907-918, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10551**: Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. Genebra, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Genebra, 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9241**: Ergonomics – Determination of metabolic heat production. Genebra, 2011.

LOPES, Cícero Furtado de Mendonça. **Análise comparativa de carga térmica entre dois métodos de cálculos para um auditório**. 2013. 53 f. TCC (Graduação) -

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MCQUISTON, Faye C.; PARKER, Jerald D.; SPITLER, Jeffrey D. Heating. **Ventilating and Air conditioning: Design and analysis, 6th edition, John Wily, NY, 2005.**

NOBRE, Jean Carlos de Almeida. **ANÁLISE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO ESTRUTURAL EM UM AUDITÓRIO UTILIZANDO O SOFTWARE ENERGYPLUS.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará.

OPENSTUDDIO v3.3.0. Disponível em: <https://openstudio.net/>. Acesso em: 12 jan. 2022.

PEDERSEN, Curtis O.; FISHER, Daniel E.; LIESEN, Richard J. **Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads.** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), 1997.

POLETO, Sabrina Fernanda Sartório. **Telhas fabricadas com resíduos de madeira de reflorestamento de Pinus sp. tratadas com CCB para o emprego na construção civil â caracterização física e propriedades térmicas.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SKETCHUP 2017 Make v17.5.2555. Disponível em: https://download.cnet.com/SketchUp-Make-2017/3000-6677_4-10257337.html. Acesso em: 12 jan. 2022.

SOUSA, David Lohan Pereira de. **ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO UTILIZANDO O SOFTWARE ENERGYPLUS.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará.