



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

JEAN CARLOS DE ALMEIDA NOBRE

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO  
ESTRUTURAL EM UM AUDITÓRIO UTILIZANDO O SOFTWARE ENERGYPLUS**

ANANINDEUA - PA  
2022

JEAN CARLOS DE ALMEIDA NOBRE

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO  
ESTRUTURAL EM UM AUDITÓRIO UTILIZANDO O SOFTWARE ENERGYPLUS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em tecnologia mecânica, pela Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio 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)**

---

D278a de Almeida Nobre, Jean Carlos.  
Análise e simulação numérica sobre desempenho térmico  
estrutural em um auditório utilizando o software energyplus / Jean  
Carlos de Almeida Nobre. — 2022.  
70 f. : il. color.

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

1. Desempenho térmico estrutural. 2. Bem-estar térmico.  
3 . Zona térmica. I. Título.

CDD 621.402

---

JEAN CARLOS DE ALMEIDA NOBRE

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO NUMÉRICA SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO  
ESTRUTURAL EM UM AUDITÓRIO UTILIZANDO O SOFTWARE ENERGYPLUS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em tecnologia mecânica, pela Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua.

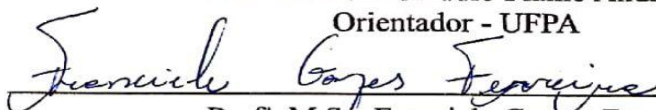
Orientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio Fialho Andrade

**APROVADO EM: 03 / 06 / 2022**

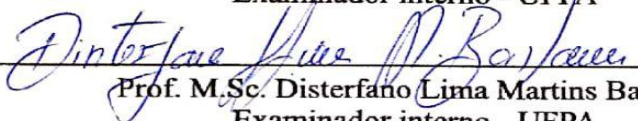
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade  
Orientador - UFPA



Prof. M.Sc. Franciele Gomes Ferreira  
Examinador interno - UFPA



Prof. M.Sc. Disterfano Lima Martins Barbosa  
Examinador interno - UFPA

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me possibilitar essa jornada.

A minha família, em especial minha avó Marlene Suely e minha mãe Roseane de Almeida que não mediram esforços em ajudar na minha caminhada acadêmica tanto na questão financeira e motivacional.

Agradeço a Universidade Federal do Pará, por me proporcionar uma experiência incrível que é estudar na maior e melhor instituição de ensino do norte do Brasil.

A Faculdade de Ciência e Tecnologia e seu corpo docente, por ter me proporcionado ensino de qualidade, e um desenvolvimento notório no meio acadêmico e pessoal, graças aos meus professores.

Ao Eng. Civil Oniwendel Felipe de Moraes Pereira juntamente ao CPGA (Divisão de Infraestrutura, Obras e Serviços), por disponibilizarem a planta baixa do futuro campus universitário de Ananindeua para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, o Prof Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade pela oportunidade e orientação deste trabalho.

## RESUMO

A referida pesquisa tem por finalidade utilizar o *software* livre *EnergyPlus* para simular e analisar o nível de temperatura na zona térmica do auditório, do campus Ananindeua 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 ambiente, 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*, a primeira simulação adotou-se somente variáveis meteorológicas e estruturais, na segunda adotou-se variáveis meteorológicas, estruturais e fisiológicas, verificando a variação da temperatura no auditório com a quantidade máxima de pessoas no local, e por fim realizou-se análises de bem-estar térmico do ambiente com a ISO 9241/2011, verificando se o auditório está confortável termicamente para seus possíveis frequentadores.

Palavras-chave: desempenho térmico estrutural, bem-estar térmico, zona térmica.

## **ABSTRACT**

The research aims to use the free software EnergyPlus to simulate and analyze the temperature level in the auditorium thermal zone, on the Ananindeua campus of the Federal University of Pará, located in Ananindeua-PA, which is under construction, with meteorological variables, constructive and physical.

The auditorium's thermal performance analysis was carried out in 2021, for the thermal zones of each month of the year, checking and indicating the time of year with the highest and lowest air temperatures in the environment, using as a database climate files from Belém-PA. simultaneously get the performance for performance analysis, were removed, from the software, the first configuration, from two changes, from two variables, from two weather variables, from two variables. meteorological, operating and analyzing a series of results. environment in the auditorium with the maximum temperature of people in the auditorium, and finally, the auditorium's thermal well-being local temperature was tested with ISO 941/2011, verifying if the auditorium is thermally comfortable for its possible visitors.

Keywords: structural thermal performance, thermal well-being, thermal zone.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Temperaturas da cidade de Belém-PA.....	17
<b>Figura 2</b> - Parâmetros da carta bioclimática de Olgyay.....	27
<b>Figura 3</b> - Transmissão de calor.....	27
<b>Figura 4</b> - Transmissão de calor.....	28
<b>Figura 5</b> - Energia radiante.....	28
<b>Figura 6</b> - Radiação solar em janelas.....	30
<b>Figura 7</b> - Temperatura de bulbo seco.....	31
<b>Figura 8</b> - Temperatura do ar úmido.....	33
<b>Figura 9</b> - Radiação solar direta por área.....	33
<b>Figura 10</b> - Radiação solar difusa por área.....	34
<b>Figura 11</b> - Dados de latitude, longitude e altura do município de Ananindeua/PA.....	44
<b>Figura 12</b> - Projeto Arquitetônico Planta Baixa Biblioteca / Auditório.....	45
<b>Figura 13</b> - Perspectiva do auditório anexo A.....	45
<b>Figura 14</b> - Auditório modelado no software <i>SketchUp Make</i> 2017.....	48
<b>Figura 15</b> - Interface de simulação do <i>Energyplus</i> .....	49
<b>Figura 16</b> - Relação dos <i>softwares</i> .....	50
<b>Figura 17</b> - Aba site do <i>Openstudio</i> .....	50
<b>Figura 18</b> - Aba <i>constructions</i> .....	51
<b>Figura 19</b> - Aba <i>loads</i> .....	51
<b>Figura 20</b> - Aba <i>geometry</i> .....	52
<b>Figura 21</b> - Aba <i>Facility</i> .....	52
<b>Figura 22</b> - Aba <i>spaces</i> .....	53
<b>Figura 23</b> - Aba <i>output variables</i> .....	53
<b>Figura 24</b> - Aba <i>run simulation</i> .....	54
<b>Figura 25</b> - Aba <i>results summary</i> .....	54
<b>Figura 26</b> - Transmissão total de radiação solar para o edifício pelas janelas.....	55
<b>Figura 27</b> - Zona térmica do auditório no mês de janeiro.....	56

<b>Figura 28</b> - Zona térmica do auditório no mês de fevereiro.....	56
<b>Figura 29</b> - Zona térmica do auditório no mês de março.....	57
<b>Figura 30</b> - Zona térmica do auditório no mês de abril.....	57
<b>Figura 31</b> - Zona térmica do auditório no mês de maio.....	58
<b>Figura 32</b> - Zona térmica do auditório no mês de junho.....	58
<b>Figura 33</b> - Zona térmica do auditório no mês de julho.....	59
<b>Figura 34</b> - Zona térmica do auditório no mês de agosto.....	59
<b>Figura 35</b> - Zona térmica do auditório no mês de setembro.....	60
<b>Figura 36</b> - Zona térmica do auditório no mês de outubro.....	60
<b>Figura 37</b> - Zona térmica do auditório no mês de novembro.....	61
<b>Figura 38</b> - Zona térmica do auditório no mês de dezembro.....	61
<b>Figura 39</b> - Zona térmica com pessoas e vestes.....	63
<b>Figura 40</b> - Edifício <i>bosco verticale</i> .....	64

## **LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS**

ASHRAE – Associação americana dos engenheiros de refrigeração, ar condicionado e aquecimento.

BLAST – Análise de cargas de construção e termodinâmica.

CERL – Laboratório de pesquisa em engenharia de construção.

CTFs – Funções de transferência de condução.

DOD – Departamento de defesa dos Estados Unidos.

DOE – Departamento de energia.

EUA – Estados Unidos da América.

INPE – Instituto nacional de pesquisas espaciais.

ISO – Organização internacional para padronização.

LBNL – Laboratório nacional lawrence berkeley.

NBR – Norma brasileira regulamentadora.

OSU – Universidade do Estado de Oklahoma.

PMV – Voto médio previsto, adimensional.

PPD – Porcentagem de pessoas insatisfeitas, adimensional.

SWERA – Avaliação de recursos de energia solar e eólica.

UFPA – Universidade Federal do Pará

UI – Universidade de Illinois.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – Área [ $m^2$ ].

$A_{ch}$  – Área de contato entre a pessoa e a superfície em questão [ $m^2$ ].

$A_d$  – Área de DuBois [ $m^2$ ].

$A_g$  – Superfície do corpo coberta [ $m^2$ ].

$A_l$  – Área de fuga de ar efetiva [ $cm^2$ ].

$C$  – Perda de calor sensível pela pele por convecção [ $W/m^2$ ].

$C_D$  – Coeficiente de descarga [adimensional].

$C_p$  – Calor específico do ar na zona.

$C_q$  – Coeficiente de fluxo [ $kg/s$ ].

$C_{res}$  – Taxa de perda de calor sensível durante a respiração [ $W/m^2$ ].

$C_T$  – Multiplicador de capacidade de calor sensível.

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  – Energia armazenada na zona de ar.

$D$  – Diâmetro [ $m$ ].

$E_{dif}$  – Taxa de perda de calor latente por difusão de água pela pele [ $W/m^2$ ].

$E_{res}$  – Taxa de perda de calor evaporativo durante a respiração [ $W/m^2$ ].

$E_{trsp}$  – Taxa de perda de calor latente por evaporação da transpiração [ $W/m^2$ ].

$f_{cl}$  – Fator de vestimenta [adimensional].

$h_c$  – Coeficiente de convecção [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ].

$I_{cl}$  – Resistência térmica das vestimentas [clo].

$I_{clu}$  – Resistência térmica parcial dos componentes das vestimentas [clo].

$L$  – Termo de acumulação de energia [ $W/m^2$ ].

$m$  – Massa [ $kg$ ].

$M$  – Taxa metabólica [ $W/m^2$ ].

$n$  – Expoente de fluxo de ar [adimensional].

$p_a$  – Pressão parcial de vapor d'água [Pa].

$p_{sat}$  – Pressão de saturação [Pa].

$Q$  – Calor líquido dissipado [ $W/m^2$ ].

$Q_{ar}$  – Fluxo de ar [ $m^3/s$ ].

$Q_{O_2}$  – Taxa volumétrica de consumo de Oxigênio [ $mL/s$ ].

$Q_{res}$  – Taxa total de perda de calor através da respiração [ $W/m^2$ ].

$Q_{sk}$  – Taxa total de perda de calor através da pele [ $W/m^2$ ].

$q'$  – Densidade de fluxo de calor [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{asol}}$  – Fluxo de radiação externa por ondas curtas [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{conv}}$  – Fluxo de calor na convecção [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{Ki}}$  – Fluxo de calor da face interna para a externa da parede [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{Ko}}$  – Fluxo de calor da face externa para a interna da parede [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{Lwr}}$  – Fluxo de radiação externa por ondas longas [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{Lws}}$  – Fluxo de radiação por ondas longas vindas de fontes internas [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{Lwx}}$  – Troca de radiação por ondas longas entre as superfícies da zona [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{sol}}$  – Fluxo de radiação solar [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $q''_{\text{sx}}$  – Fluxo de radiação por ondas curtas vindo das luzes [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $Q_{\text{sys}}$  – Sistemas de saída de ar.  
 $R$  – Perda de calor sensível pela pele por radiação [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $RQ$  – Quociente de respiração [adimensional].  
 $RS$  – Radiação total incidente na superfície [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].  
 $R_{se}$  – Resistência superficial externa [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ].  
 $t_a$  – Temperatura do ar [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $T_{\text{bs}}$  – Temperatura de bulbo seco [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $t_{\text{cl}}$  – Temperatura exterior da vestimenta [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $T_{\text{ext}}$  – Temperatura externa [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $t_g$  – Temperatura de globo [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $T_i$  – Temperatura no lado interno da face da parede [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $T_{\text{int}}$  – Temperatura interna [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $T_o$  – Temperatura no lado externo da face da parede [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $t_o$  – Temperatura operante [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $t_{\text{m}}$  – Temperatura média radiante [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $t_{\text{sk, m}}$  – Temperatura média da pele [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $U$  – transmitância térmica [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ].  
 $UR$  – Umidade Relativa [%].  
 $V$  – Volume [ $\text{m}^3$ ].  
 $va$  – Velocidade do ar [m/s].  
 $V_a$  – Velocidade do ar [m/s].  
 $x_f$  – Espessura das roupas [mm].  
 $X_j$  – Coeficiente CTF externo em relação à parede [adimensional].

$Y_j$  – Coeficiente CTF no interior da parede [adimensional].

$Z_j$  – Coeficiente CTF interno em relação à parede [adimensional].

$z$  – Coordenada de altura [m].

$z_0$  – Altura de referência [m].

$W$  – Taxa de trabalho externo realizada [ $W/m^2$ ].

$\alpha$  – Expoente de velocidade de ar [adimensional].

$\alpha_0$  – Ângulo de inclinação da superfície.

$\alpha'$  – Absortividade solar (função da cor).

$\alpha''$  – Absortividade do vidro.

$\Delta P$  – Variação de pressão [Pa].

$\Delta P_r$  – Diferença de pressão de referência [Pa].

$\varepsilon$  – Emissividade [adimensional].

$v(z_0)$  – Velocidade do vento na altura de referência  $z_0$  [m/s].

$\rho_{air}$  – Densidade do ar na zona.

$\rho$  – Densidade do ar [ $kg/m^3$ ].

$\varrho'$  – Refletividade solar.

$\varrho''$  – refletividade do vidro

$\sigma''$  – Transmissividade do vidro

$\Phi_j$  – Coeficiente CTF de fluxo [adimensional].

$\Delta R_L$  – Diferença entre a radiação de onda longa emitida e recebida pela superfície.

$N_{sl}$

$\sum_{i=1} Q_i$  – Soma das cargas internas convectivas.

$N_{surfaces}$

$\sum_{i=1} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – Transferência de calor por convecção das superfícies da zona.

$N_{zones}$

$\sum_{i=1} m_i C_p (T_{zi} - T_z)$  – Transferência de calor devido à mistura de ar entre zonas.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
<b>1.3 Estrutura do trabalho.....</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Estudos sobre Desempenho Térmico.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 O software EnergyPlus.....</b>	<b>22</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Contexto histórico e normas regulamentadoras.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Conforto Térmico.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3 Estratégias Bioclimáticas.....</b>	<b>26</b>
<b>3.4 Propriedades térmicas dos elementos construtivos.....</b>	<b>27</b>
3.4.1 Desempenho térmico de paredes.....	27
3.4.2 Comportamento dos materiais opacos diante da radiação solar.....	28
3.4.3 Desempenho térmico de coberturas.....	29
3.4.4 Desempenho térmico de janelas.....	30
<b>3.5 Variáveis ambientais importantes.....</b>	<b>31</b>
3.5.1 Temperatura do ar, $t_a$ .....	31
3.5.2 Temperatura média radiante, $t_{rm}$ .....	31
3.5.3 Velocidade do ar, $V_a$ .....	32
3.5.4 Umidade do ar.....	32
3.5.5 Radiação solar.....	33
<b>3.6 Variáveis pessoais e fisiológicas.....</b>	<b>34</b>
3.6.1 Taxa metabólica.....	34
3.6.2 Resistência térmica das vestimentas, $I_{cl}$ .....	35
3.6.3 Temperatura da pele, $t_{sk}$ .....	37
3.6.4 Taxa de secreção de suor, $E_{trsp}$ .....	37
<b>3.7 Balanço Térmico.....</b>	<b>37</b>
<b>3.8 Índices de Conforto Térmico.....</b>	<b>40</b>
3.8.1 Voto Médio Previsto, $PMV$ .....	40

3.8.2 Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas, <i>PPD</i> .....	41
<b>3.9 Metodologia de Cálculo base do <i>EnergyPlus</i>.....</b>	<b>41</b>
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>44</b>
4.1 Parâmetros de análise.....	44
4.2 Ananindeua.....	44
4.3 Dados estruturais.....	45
4.4 Simulação.....	48
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>55</b>
5.2 Zona térmica de fevereiro.....	56
5.3 Zona térmica de março.....	57
5.4 Zona térmica de abril.....	57
5.5 Zona térmica de maio.....	58
5.6 Zona térmica de junho.....	58
5.7 Zona térmica de julho.....	59
5.8 Zona térmica de agosto.....	59
5.9 Zona térmica de setembro.....	60
5.10 Zona térmica de outubro.....	60
5.11 Zona térmica de novembro.....	61
5.12 Zona térmica de dezembro.....	61
5.13 Análise anual com cargas internas (pessoas e suas vestes).....	62
5.14 Possíveis melhorias.....	63
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>66</b>
6.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	66
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Melhorar a vida dos seres humanos na terra é um objetivo que sempre está presente em diversas discussões pelo planeta. Com o passar do tempo inúmeras pesquisas são produzidas sobre desempenho térmico de determinados edifícios, analisando fatores termodinâmicos presentes no ambiente, confirmando a importância de estudos concretos sobre eficiência energética.

Diversas pesquisas estão relacionadas ao desempenho térmico de edifícios, aprimoramentos feitos através desses estudos nos garantem qualidade de vida, com visão de várias possibilidades de melhorias, por exemplo: econômica, redução de consumo elétrico, ou no âmbito social, como o bem-estar da população em relação à saúde e conforto térmico.

No âmbito da saúde dos seres humanos, um local climatizado é o ideal. Em ambientes bem condicionados, possíveis doenças tendem a diminuir, geradas pelas diversidades climáticas da localidade, nos dias mais frios e úmidos, pode ocorrer o desenvolvimento de diversos males para a saúde, geralmente problemas respiratórios devido a isto melhorias são indispensáveis.

Obtendo uma boa pesquisa em um edifício, aprimoramentos no desempenho térmico podem ser sugeridos. O *EnergyPlus* é um *software* de simulação energética de edifícios, que diversos pesquisadores utilizam para analisar fatores energéticos. Seu desenvolvimento é patrocinado pelo escritório de tecnologias de construção de energia dos Estados Unidos, é um *software* gerado em console que interpreta a entrada e salva a saída em arquivos de texto. Vinculado ao *Openstudio* que foi criado pelos mesmos desenvolvedores do *Energyplus* para melhorar a usabilidade do *software*.

Com o programa *Sketchup Make* realizou-se o desenho arquitetônico do auditório da Universidade Federal do Pará localizado em Ananindeua-PA, O *Energyplus* e *SketchUp* são vinculados ao *Openstudio* que funciona como um gerenciador de ambos, acessando o desenho arquitetônico gerado pelo *SketchUp* e bancos de dados e métodos do *Energyplus*.

O arquivo climático inserido no *EnergyPlus* é da cidade de Belém do Pará, devido a isto, o conhecimento da temperatura da cidade no ano de 2021 é importante para o estudo, podendo ser averiguado certa discrepância entre a temperatura do auditório com a temperatura da cidade devido às variáveis meteorológicas, estruturais e fisiológicas, conforme a Figura 1 abaixo tem-se dados climáticos de Belém do Pará, para o ano de 2021.

Figura 1 - Temperaturas da cidade de Belém-PA.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novem- bro	Dezembro
Temperatura média (°C)	26.2	25.7	25.6	25.7	26.1	26.3	26.4	27.1	27.6	27.9	28.1	27.3
Temperatura mínima (°C)	24.4	24.1	24.1	24.1	24.3	24.3	24.2	24.5	24.7	24.9	25.2	25
Temperatura máxima (°C)	29.3	28.6	28.5	28.5	29.1	29.4	29.8	31	31.7	32.1	32.2	30.8
Chuva (mm)	239	322	404	398	264	117	78	43	29	31	43	117
Umidade(%)	84%	87%	87%	88%	86%	83%	81%	77%	74%	72%	72%	78%
Dias chuvosos (d)	20	19	22	21	20	16	13	9	6	5	6	14
Horas de sol (h)	7.5	6.7	6.4	6.2	7.3	8.6	8.9	9.0	8.3	8.4	8.6	8.5

Fonte: <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/para/belem-4299/>

A ISO 21929 (*International Organization for Standardization*), adotou em sua norma a definição de um quadro para o desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para a construção com base na premissa de que o desenvolvimento sustentável dos edifícios deve produzir o desempenho e a funcionalidade exigidas com o mínimo de impacto ambiental.

Segundo Corbella e Yannas (2003), mostram que para conceituar arquitetura sustentável podemos entender como a elaboração e execução de empreendimentos que visem o aumento da qualidade de vida do ser humano quanto ao ambiente construído e o seu entorno, integrado às características da vida e do clima locais.

## 1.1 Justificativa

O trabalho visa simular e analisar o desempenho térmico estrutural do auditório nos meses de 2021, essa pesquisa se concentra somente no auditório do campus Universitário de Ananindeua, da UFPA.

A importância de aprimorar a qualidade de vida humana, racionalizar energia, aprimorar o desempenho térmico dos edifícios e conceder bem-estar térmico está ocasionando um aumento nos estudos relacionados, com *softwares* de simulação computacional para cargas térmicas. Neste meio obviamente, diversos *softwares* vão surgindo.

Um entre estes diversos *softwares* é o *EnergyPlus*, um programa de simulação de carga térmica e análise energética que tem sua base nos *softwares* DOE-2, (*Department of Energy*) dos EUA e BLAST (*Building Loads Analysis and Thermodynamics*). Na atualidade o *EnergyPlus* é ferramenta oficial do departamento de energia dos Estados Unidos para análises de edificações. Por ser um *software* basicamente novo, pesquisas que ilustram resultados e suas funcionalidades são relevantes para o mundo acadêmico e profissional.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa pretende simular e analisar o desempenho térmico estrutural de um auditório, ou seja, analisar zonas térmicas para cada mês do ano de 2021, ilustrando as temperaturas internas do ar no edifício, com o auxílio do programa *EnergyPlus*.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Após a primeira análise estrutural do auditório, realizar uma nova simulação com pessoas e suas vestes verificando a variação de temperatura do ar no auditório, com essas novas cargas.
- Analisar resultados referentes à transmissão térmica solar que adentram no auditório pelas janelas.
- Ilustrar e analisar dados do arquivo climático disponível pelo *EnergyPlus*.
- Averiguar possíveis problemas de desconforto térmico conforme os parâmetros da ISO 9241 e propor melhorias para o auditório.

## 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho engloba seis capítulos. No capítulo 1 foi apresentado a importância do estudo de desempenho térmico e apresentação dos *softwares* utilizados nesta pesquisa, bem como as motivações, justificativas e também os objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 contém uma revisão sobre desempenho térmico e conforto térmico, onde são abordados trabalhos científicos, com fatos históricos, etapas e formas de execução, e resultados obtidos.

No Capítulo 3 apresenta-se as abordagens para o tratamento de situações envolvendo desempenho térmico em estruturas, ilustrando formulação teórica e analítica.

O Capítulo 4 apresenta os principais detalhes das simulações numéricas e da estrutura (auditório) estudada.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados finais das simulações para cada zona térmica.

O Capítulo 6 aborda se os objetivos estabelecidos foram alcançados, conclusões acerca do que foi abordado em capítulos anteriores, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estudos sobre Desempenho Térmico

Nobre et al. (2021), realizou um estudo sobre desempenho térmico em uma residência conjunta no mês de março em Ananindeua-PA utilizando o *software EnergyPlus*, onde foram levadas em consideração variáveis climáticas e estruturais. Análises sobre as cargas térmicas em sistemas da edificação são realizadas aplicando diversos materiais de construção em um modelo 3D do residencial, por exemplo, a modelagem é feita através da inserção de materiais com camadas paralelas entre si e perpendiculares ao fluxo de calor (reboco, tijolo, telha, laje, piso, etc). Com isso, gerou-se uma zona térmica com temperaturas de 21 °C até 29 °C no mês de março e com estes dados averiguou-se se as unidades (quartos) cumpriam os padrões estabelecidos pela ISO 9241/2011 sobre bem-estar térmico. Os dias dentro dos padrões térmicos de conforto foram os dias 05, 11 e 12 para a Unidade 1, 04 e 18 para a Unidade 2, 04 e 18 para a Unidade 3 e 04, 05, 12 e 18 para a Unidade 4.

Associação Americana dos Engenheiros de Refrigeração, Ar condicionado e Aquecimento (ASHRAE) em 1950, começou a planejar um grupo de estudo para avaliar o conforto térmico, com essa iniciativa foi construída uma instalação de pesquisa ambiental, no laboratório dessa associação em Cleveland (EUA). Em 1960, a partir de experiências desenvolvidas no laboratório e em demais locais, resultaram em uma importante bibliografia para o tema de conforto térmico.

Barbosa (1997), realizou um estudo com a intenção de criar um método para caracterizar e analisar o funcionamento térmico de edifícios térreos, habitacionais. O método foi empregado em cinco edifícios na localidade de Londrina, PR, onde tirou-se medições no período de maior calor (verão) e no período mais frio (inverno), coletadas as informações dos edifícios e o cotidiano dos indivíduos no local. Com um instrumento de simulação e a data climática estabelecida, realizou-se as análises da construção, gerando o tempo (horas) de incômodo anual para cada área e atestou que o funcionamento térmico das residências revestidas de ardósia e argamassa armada é significamente menor em comparação com, paredes monolíticas feitas de concreto, paredes feitas de tijolos cerâmicos e paredes de blocos de concreto, mostrando a importância da massa na diminuição do período (horas) de desconforto em londrina.

Paulo Sá (1931), teve sua primeira publicação na Revista Brasileira de Engenharia, em março de 1934. Esta primeira pesquisa foi realizada com um grupo de alunos de 14 a 17

anos, onde em dias diferentes foram medidas simultaneamente a temperatura, a umidade e a velocidade do ar, junto com a elaboração de fichas individuais onde os alunos registravam a sensação de calor, em uma escala de 1 a 7. As condições físicas do ambiente foram medidas com o termômetro de Leonard Hill e um termômetro para as temperaturas seca e úmida. Observações foram feitas entre 11 e 12 horas de agosto e setembro de 1931, com um total de 250 observações individuais, inclusive as do próprio engenheiro. Desta primeira pesquisa conclui-se que os valores “estados equivalentes” são diferentes para brasileiros e americanos, e que o conforto térmico brasileiro exige uma maior temperatura efetiva do que para os americanos, ou seja, o estado correspondente à temperatura “ótima” de conforto para os brasileiros estaria em torno de 22 °C da escala americana de temperaturas efetivas. Como a temperatura americana efetiva “ótima” está em torno de 19,5 °C, foi mostrado que o conforto térmico brasileiro parece exigir uma maior temperatura efetiva do que a necessária para os americanos; pois para os brasileiros a temperatura de 19,5 °C é relativa à sensação “fresca”, entre outras conclusões.

Jones (2002), comentou sobre as capacidades e limitações de modelos térmicos para serem utilizados como padrões de bem-estar térmico e cita que há três importantes limitações: nenhum modelo que é incluído em um padrão deve ser preciso e inequivocamente definido; o uso de um modelo é limitado para aquelas condições; o usuário de um modelo padrão deve entender a necessidade para definir as entradas desse modelo corretamente. No mesmo trabalho, os modelos de balanço de calor são boas ferramentas que representam meios práticos para incorporar as numerosas possibilidades de combinação de variáveis em um modelo padrão.

Havenith (2002), pesquisou a relevância dos tipos das roupas e do metabolismo na situação do Voto Médio Previsto (*PMV*). Na pesquisa relatou-se que os segmentos dinâmicos são esquecidos em vários casos e as implicações da movimentação corporal e da movimentação do ar teve tanta relevância que começou a ser levada em consideração em padrões de bem-estar térmico que esperassem serem verdadeiramente eficazes. Em relação ao índice metabólico foi relatado que as técnicas da sua definição, ao decorrer disto a ISO 8996 (*ISO – International Standards Organization*), não geram a eficácia necessária e para a obtenção de uma análise certa de bem-estar, é de extrema importância dimensões exatas e precisas dos índices metabólicos.

Segundo Humphreys (1976), por meio de correlações entre os demais estudos da área de bem-estar térmico, mostra que a temperatura em que os indivíduos se deparam, sem levar em consideração gênero e idade, seria capaz de ser calculada por meio da temperatura média

interna da área onde os indivíduos se encontram, ilustrando uma oscilação de 1 °C para maior ou para menor, conclui-se que os índices de bem-estar térmico diferenciam-se em ligação à temperatura média do território onde as pesquisas são desenvolvidas.

Nicol (1993), em seu estudo, expôs a presença de várias condutas que os indivíduos são capazes de cumprir com o intuito de adquirirem o conforto térmico e dentre as primordiais ações são: mudanças em seu índice de criação de energia; mudanças do índice de perda de calor; mudanças do local térmico e escolha de um local diferente.

Olesen e Parsons (2002), explicaram que as pesquisas na área mostram que os territórios que têm climatização utilizando as taxas *PMV/ PPD* estavam de acordo com as recomendações da norma ISO 7730, chegando a conclusão que existem pequenas informações sobre os efeitos combinados do conforto térmico geral e o conforto térmico local. Alguns estudos têm sido realizados com o intuito de determinar a influência da velocidade do ar no desconforto térmico geral, porém a influência do conforto térmico geral sobre outros parâmetros de desconforto locais como temperatura média radiante assimétrica e temperatura de solo não tem sido estudada.

Dilkin (2000), realizou um estudo de sete regras estrangeiras e duas brasileiras, para edifícios térreos habitacionais. Por conseguinte, estabeleceu um modelo padrão de residência em Porto Alegre, RS, em que determinou o cotidiano habitacional, ganhos internos e renovação do ar, para dias mais frios e dias mais quentes. Com intenção de estudar e assemelhar o comportamento térmico dos edifícios, usou o software TRNSYS. O desempenho térmico dos edifícios estudados com as regras para o clima de Porto Alegre foi aceitável, porém a regra do Reino Unido não conciliou. Constatou-se que a aplicação de sombras nos determinados territórios envidraçados e mudanças feitas nos componentes térmicos nas paredes e da cobertura do edifício, melhoram o desempenho térmico do edifício.

Xavier (1999), criou um método para a definição de taxas e padrões de bem-estar térmico provenientes de pesquisas de campo em uma escola de Florianópolis, em que coletou-se as variáveis ambientais e vários aspectos cotidianos dos frequentantes. Nesta pesquisa, o índice metabólico e as vestes dos frequentantes não foram levadas em consideração como influências naturais sobre o bem-estar térmico. O método desenvolvido, baseia-se em estudos estatísticos, para a determinação dos parâmetros de conforto apresentou melhorias de correlação entre as sensações determinadas pelo modelo estatístico e as sensações relatadas pelas pessoas, quando comparadas às metodologias propostas nas normas. Foi comentado sobre a necessidade de especificação de zonas de conforto

diferenciadas para cada região e verificou-se a adaptação das pessoas ao clima.

Sousa, Nobre e Andrade (2021), realizaram uma pesquisa onde são investigadas numericamente as condições climáticas para o ano de 2021, da cidade de Belém-PA, usando dois arquivos climáticos diferentes. O arquivo climático disponível no repositório do *software EnergyPlus* é processado no *software* para a obtenção das temperaturas médias mensais, que são então confrontadas com as temperaturas que constam no arquivo climático disponibilizado na base dados *CLIMATE-DATA.ORG*. Os resultados obtidos mostraram variações de temperaturas médias, mínima e máxima de 0,1 °C até 1,7 °C, que sugerem um bom grau de confiança no algoritmo de processamento dos dados climáticos do *EnergyPlus*.

## 2.2 O *software EnergyPlus*

De acordo com Crawley (2002), o *EnergyPlus* é um programa recente, que foi gerado em 1996 através da grupo formado pela Universidade de Illinois (UI), pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Construção do Exército dos Estados Unidos (CERL) a Universidade do Estado de Oklahoma (OSU), a *Analytics GARD*, o Laboratório Nacional *Lawrence Berkeley* (LBNL), e o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). O *software* inicial teve sua versão no fim de 1999, por ser novo, está em constante evolução, com a sua versão atual, 9.6.0. A essência da simulação está no modelo que utiliza princípios fundamentais de balanço energético, o *software* realiza cálculos numéricos baseados nos princípios de balanço de massa e energia (1ª Lei da termodinâmica) e possibilita simulações integradas de cargas térmicas e sistemas em regime transiente.

Strand (2002), constatou em sua pesquisa que o *software* está fundamentado nas funcionalidades mais relevantes de outros *softwares* de simulação termodinâmica em edifícios o DOE-2, financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), e o *Building Loads Analysis and System Thermodynamics*, BLAST, gerado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD) embora esteja fundado em outros programas, o *EnergyPlus* é um *software* novo que entende por completo um código estruturado e modular feito em Fortran 90.

Pedersen (2001), mostrou que o *software EnergyPlus* tem sua estrutura de forma modular para favorecer a injeção de novos atributos e acelerar a sua correlação entre determinados *softwares*, a composição do programa é feita por três aspectos básicos que consta no bloco principal do *software*; um módulo de simulação dos sistemas da edificação, um módulo de simulação do balanço de calor e massa e um gerenciador de simulação.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Contexto histórico e normas regulamentadoras

As principais pesquisas sobre desempenho térmico surgiram a partir de 1913 e foram realizadas na América do Norte especificamente nos EUA. A partir daí e até os dias atuais este tema está sendo estudado em diversas partes da terra e várias metodologias vêm sendo geradas para a análise do bem-estar térmico da humanidade. A metodologia mais popular e grandemente aceita é o *Predicted Mean Vote (PMV)*, que foi apresentado pelo dinamarquês Ole Fanger. Em sua pesquisa utilizou dados gerados em experiências laboratoriais, com mais de 1300 humanos, gerando uma equação que concede, desde do levantamento dos aspectos ambientais e humanos, avaliar a sensação térmica média de um grupo de indivíduos (*PMV*) quando encontrado em uma definida combinação dessas diversidades.

Fanger (1970), quantificou a porção de pessoas insatisfeitas com o ambiente, relacionando a porcentagem estimada de insatisfeitos com o valor do Voto Médio Previsto. A ISO 7730 (1984) e atualizada em 1994 assumiu o método de Fanger como base para delimitação de conforto térmico em determinados tipos de ambiente.

No Brasil, as pesquisas mais relevantes sobre métodos de análise de conforto térmico são de: Paulo Sá (1934), Xavier & Lamberts (1997), e Ribeiro (1945).

Fanger (1970), alega que para um definido metabolismo, as variáveis corporais que podem influenciar no equilíbrio térmico, são a quantidade de calor perdida por evaporação do suor e a temperatura média da camada. Isso mostra que, para determinados tipos metabólicos existe uma quantidade de calor perdida por evaporação do suor e uma temperatura média da pele e que estão diretamente ligadas ao bem-estar térmico. Esta observação é de extrema importância para o método dos Votos Médios Previsto. Demonstrada na obra FANGER (1970), utilizando parâmetros dos experimentos de McNall (1967), e Rohles (1966), os resultados dos equacionamentos se mostraram coerentes para atividades sedentárias, em relação à temperatura e umidade, as diferenças das análises foram menores que 1 °C, o equacionamento de certa forma era complexo, por isso Fanger (1967), gerou séries de combinações de variáveis pessoais e ambientais com o auxílio de um computador que tinham compatibilidade com o equacionamento, aprimorando e sistematizado cálculos de conforto térmico.

A ISO 7730/1994 e ASHRAE Fundamentals (1997), estão baseadas no balanço térmico entre o corpo humano e o meio ambiente, a indicação do bem-estar citadas pelas normas por meio de trocas de calor geradas pela camada de pele e pela respiração. Quando o

calor corporal é dissipado para o ambiente, o balanço térmico é alcançado. E é dito que o corpo está em “equilíbrio térmico” ou “neutralidade térmica”.

A organização ASHRAE 1992, relata condições em sua norma ASHRAE 55 para ocupação humana, que mostra informações sobre os períodos e localizações de medições, isolamento das vestimentas, o desconforto devido à ventilação e uma bibliografia para estudos térmicos.

A ISO 9241, informa que o padrão é manter a temperatura entre 20 °C e 24 °C no verão e 23 °C e 26 °C no inverno, com umidade relativa entre 40% e 80%.

A ISO 7730 em 1984 adotou o modelo de Fanger, *PMV* e *PPD*, para regulamentação internacional sobre conforto térmico. Essa normalização é voltada para a análise de ambientes moderados, ou seja, ambientes que apresentam variáveis de conforto em um *PMV* entre -2 a +2. A norma não leva em consideração somente o desconforto térmico corporal com um todo, mas os ocorridos em locais específicos. Os parâmetros mostrados ilustram que um local só é confortável quando 80% das pessoas estiverem em equilíbrio térmico.

Conforme a ISO 7730, o *PMV* e os intervalos de conforto são dados em função de taxas térmicas, conhecido como temperatura operante (*to*). A temperatura operante é a temperatura uniforme de um ambiente no qual há trocas de calor por radiação e convecção.

A temperatura operante pode ser calculada pela equação abaixo:

$$to = A.ta + (1 - A).trm \quad (3.1)$$

com:

$A = 0,5$  para  $va < 0,2$  m/s ;

$A = 0,6$  para  $0,2 < va < 0,6$  m/s ;

$A = 0,7$  para  $0,7 < va < 1,0$  m/s.

onde:

*to* = Temperatura operante;

*ta* = Temperatura do ar, °C;

*trm* = Temperatura radiante média, °C;

*va* = Velocidade do ar, m/s.

*A* = Constante em função de *va*, adimensional.

As pesquisas em laboratório de Rohles, (1966); Mcnall, (1967) e Fanger, (1970) que agrupam a ISO 7730 foram feitas em nações de climas diversos.

Tem-se como exemplo pesquisas em outras nações de De Dear, Leow & Ameen, 1991; Tanabe, Kimura & Hara, 1987; Chung & Tong, 1990, seus resultados obtidos não apresentaram variações em torno de  $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ , em relação às bases térmicas neutras.

No Brasil existe a NBR 6401 (1980), que fornece padrões para projetos de instalações de ar condicionado. A norma apresenta intervalos de umidade relativa e temperatura do ambiente para o bem estar térmico dos indivíduos em atividade sedentária. A norma brasileira não ilustra sobre influências de temperatura radiante média, vestimenta, atividade física e da velocidade do ar, entretanto a norma não está em discordância com a ISO 7730 (1994).

A ISO 7730 destina-se a pessoas saudáveis e tem como meta divulgar um método para analisar e definir parâmetros térmicos em relação a sensação térmica e a quantidade de indivíduos insatisfeitos quando localizados em locais térmicos moderados, a metodologia dessa norma é o *PMV* (Voto Médio Previsto), que foi baseada em pesquisas citadas acima, mostrando condições ambientais favoráveis para o bem-estar térmico. A norma é utilizada tanto em projetos de ambientes novos e já existentes. A análise do bem-estar térmico por essa norma necessita a utilização de outras normas a ISO 7726 (1985) que ilustra métodos e características dos instrumentos para análise do bem-estar térmico, ISO 8996 (1990) que usa uma metodologia para o conhecimento da taxa metabólica e a ISO 9920 (1995), que estima as características térmicas das vestimentas. Porém existem diversos fatores que podem interferir nos resultados e que não são ilustrados com certo aprofundamento pela norma. Logo, os itens seguintes explicam a metodologia de avaliação do bem-estar térmico mostrado na norma ISO 7730, existem outras normas ergonômicas relacionadas a sensação térmica, como a ISO 9920, 10551, entre outras. Mas as quatro normas ISO citadas acima e a ASHRAE 55 satisfazem as necessidades desta pesquisa.

### **3.2 Conforto Térmico**

Em suas experiências Fanger (1970), demonstra que um ambiente termicamente agradável é gerado "como uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico". Conforme o estudo, Fanger demonstrou que não é viável agradar termicamente todos os indivíduos que estão na mesma localidade térmica, devido às características individuais de cada pessoa.

Obter o bem-estar térmico é a forma em que dissipa-se calor em determinado ambiente até atingir a "neutralidade" para um adequado funcionamento corporal. Os seres humanos devem manter sua temperatura interna por volta de 37 °C. Esta temperatura corporal que o ser humano deve apresentar torna o equilíbrio térmico extremamente importante entre cada indivíduo e o seu ambiente, quando obtemos a percepção psicológica e física desse equilíbrio ou neutralidade, o bem-estar térmico é atingido.

O bem-estar térmico se refere diretamente a uma sensação subjetiva, dependente de aspectos biológicos, físicos e emocionais dos seres humanos. Por depender diretamente de vários aspectos, nem sempre é possível satisfazer a todas as pessoas que ocupam determinada localidade em uma condição térmica.

Uma localidade agradável termicamente é aquela em que o equilíbrio entre a geração de calor metabólico e as trocas de calor, ganhos e perdas, provenientes do ar em volta da pessoa com o ambiente seja mantido dentro dos padrões desejáveis.

Os aspectos ambientais que influenciam e podem interferir no conforto térmico são: umidade relativa do ar, temperatura do ar, pressão parcial de vapor, velocidade do ar e temperatura média radiante. As características individuais são: resistência térmica das roupas (vestimentas) e tipo de atividade, ilustrando sua taxa metabólica.

Outras características fisiológicas como, temperatura da pele e taxa de secreção de suor, podem interferir no conforto dos indivíduos.

De acordo com estudos e as leis da termodinâmica, quando corpos de níveis de temperaturas diferentes estão em determinado ambiente, ocorre a transferência de calor do corpo com temperatura mais elevada para o mais frio até que se chegue ao equilíbrio ou igualdade das temperaturas. O bem-estar térmico é alcançado por meio destas trocas térmicas, que são feitas por condução, convecção, radiação e evaporação.

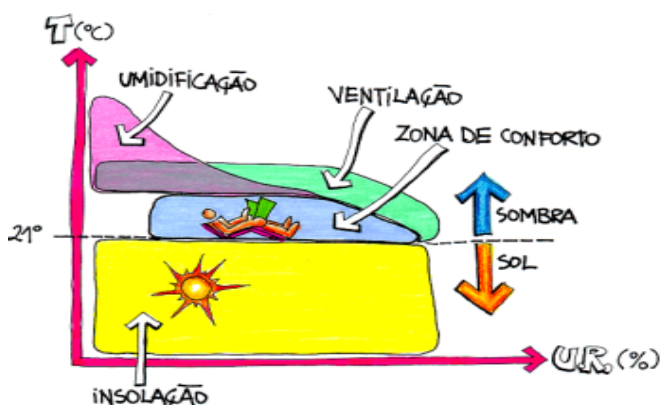
### **3.3 Estratégias Bioclimáticas**

Olgay (1973), criou a expressão Projeto Bioclimático, que visa a adequação da arquitetura ao clima local. A bioclimatologia estuda as relações entre o clima e os seres vivos. Como forma de analisar condições climáticas para gerar uma arquitetura com desempenho térmico apropriado.

O projeto de arquitetura deve atender à eficiência energética e às condições de conforto do usuário. A utilização das estratégias passivas de aquecimento e de resfriamento

no projeto proporciona a redução do tempo de utilização de sistemas artificiais para atingir o conforto térmico, consequentemente reduz o consumo de energia nas edificações. Por isso, para a eficaz aplicação das estratégias bioclimáticas em projeto é necessário a correta análise do local, a partir dos dados disponíveis. Na década de 1960, Olgay desenvolveu o conceito de carta bioclimática, que visa determinar estratégias de adaptação da arquitetura ao clima.

Figura 2 - Parâmetros da Carta bioclimática de Olgay



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira, (2014)

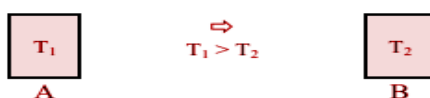
### 3.4 Propriedades térmicas dos elementos construtivos

Os materiais e elementos estruturais se condicionam termicamente em função de seu desempenho térmico. A NBR 15220-2 (2005), fornece tabelas com as principais propriedades térmicas dos materiais que pertencem aos elementos estruturais e apresenta os métodos analíticos, para elementos homogêneos e heterogêneos, de transmitância térmica, fator solar e atraso térmico, alguns métodos ilustrados abaixo:

#### 3.4.1 Desempenho térmico de paredes

A condição essencial para a transmissão de calor é que os corpos tenham temperaturas diferentes, a Figura 3 exemplifica esta afirmação.

Figura 3 - Transmissão de calor

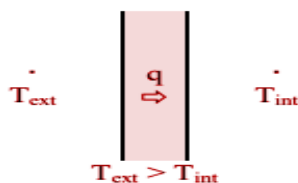


Fonte: Autoria própria, (2022)

O corpo A cede parte de sua energia térmica, o que provoca uma redução de sua

temperatura enquanto que o B, ao assimilar esta energia térmica, aumenta sua temperatura. O processo continua até que as temperaturas se igualem ( $T_1 = T_2$ ), ou seja, até que se atinja o equilíbrio térmico. Para o caso de paredes, a Figura 4 apresenta o sentido do fluxo de calor em função da diferença de temperatura externa e interna.

Figura 4 - Transmissão de calor.



Fonte: Autoria própria, (2022)

Portanto, a equação abaixo mostra o fluxo de calor que atravessa a parede.

$$q' = U.(T_{ext} - T_{int}) = U.\Delta T \quad (3.2)$$

onde:

$q'$  = é a densidade de fluxo de calor,  $W/m^2$ ;

$U$  = é a transmitância térmica,  $W/m^2 .K$ ;

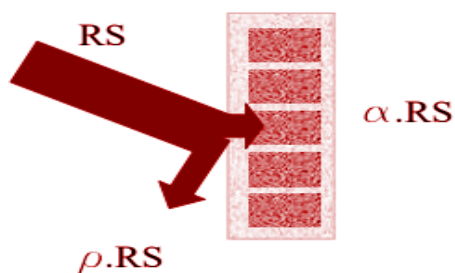
$T_{ext}$  = Temperatura externa;

$T_{int}$  = Temperatura interna.

### 3.4.2 Comportamento dos materiais opacos diante da radiação solar

Quando a energia radiante incide sobre um corpo opaco ela é absorvida ou refletida, como se pode observar na Figura 5.

Figura 5 - Energia radiante



Fonte: Adaptado de Barbosa, (1997)

A equação abaixo mostra o balanço térmico da radiação solar.

$$\alpha'.RS + \rho'.RS = RS \rightarrow \alpha' + \rho' = 1 \quad (3.3)$$

onde:

$RS$  = radiação total incidente na superfície, W/m<sup>2</sup>;

$\alpha'$  = absorvidade solar (função da cor);

$\rho'$  = refletividade solar.

A temperatura *sol-ar* ( $T_{sol-ar}$ ) representa o efeito combinado da radiação solar incidente no fechamento e dos intercâmbios de energia por radiação e convecção entre a superfície e o meio envolvente; nestes processos intervêm o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) e a emissividade ( $\varepsilon$ ) do material. A temperatura *sol-ar* é dada pela equação abaixo.

$$T_{sol-ar} = T_{ext} + \alpha'.RS.R_{se} + \varepsilon.\Delta R_L.R_{se} \quad (3.4)$$

onde:

$RS$  = radiação total incidente na superfície, W/m<sup>2</sup>;

$R_{se}$  = resistência superficial externa; representa as trocas de calor por convecção e radiação entre a superfície e o meio, m<sup>2</sup>K/W;

$\Delta R_L$  = diferença entre a radiação de onda longa emitida e recebida pela superfície.

### 3.4.3 Desempenho térmico de coberturas

Para planos horizontais, como coberturas, o termo  $\varepsilon.\Delta R_L.R_{se}$ , segundo dados experimentais, é igual a 4 °C, visto que as camadas altas da atmosfera têm sempre uma baixa temperatura fazendo com que estes planos percam permanentemente energia por radiação. Portanto, temos a partir da equação 3.4:

$$T_{sol-ar} = T_{ext} + \alpha'.RS.R_{se} - 4 \quad (3.5)$$

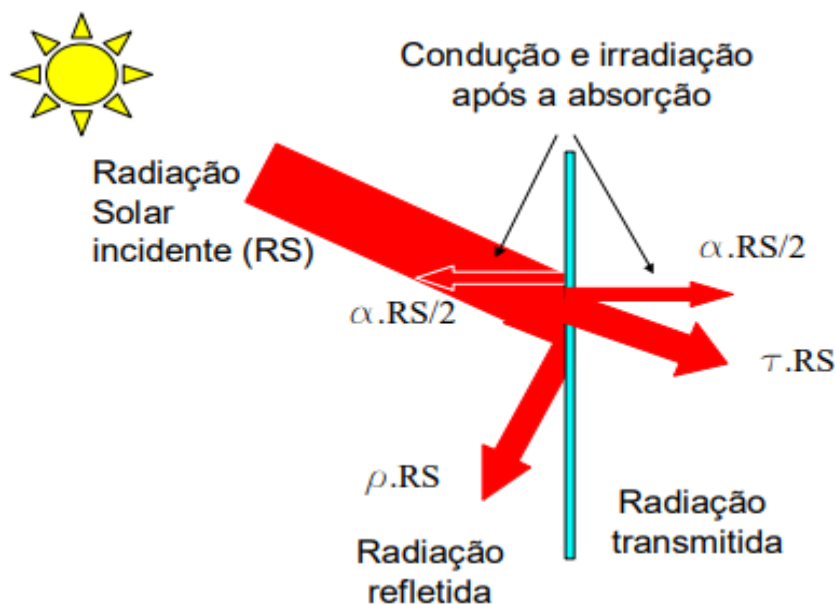
Esta subtração de 4 °C também se aplica durante o período noturno. A condensação da umidade atmosférica é facilmente percebida nestas superfícies horizontais devido às

perdas de calor por radiação.

### 3.4.4 Desempenho térmico de janelas

Os vidros são materiais transparentes às radiações visíveis e permitem a iluminação natural do espaço interior, estabelecendo uma conexão visual com o exterior. Porém, podem gerar problemas térmicos, acústicos e econômicos. Quando a energia radiante incide sobre uma superfície transparente ela é absorvida, refletida ou transmitida como se pode observar na Figura 6.

Figura 6 - Radiação solar em janelas



Fonte: Adaptado de Barbosa, (1997)

A equação abaixo mostra o balanço térmico para a Figura 6.

$$\alpha'' .RS + \rho'' .RS + \sigma'' .RS = RS \rightarrow \alpha'' + \rho'' + \sigma'' = 1 \quad (3.6)$$

onde:

$RS$  = radiação total incidente na superfície,  $W/m^2$ ;

$\alpha''$  = absortividade do vidro;

$\rho''$  = refletividade do vidro;

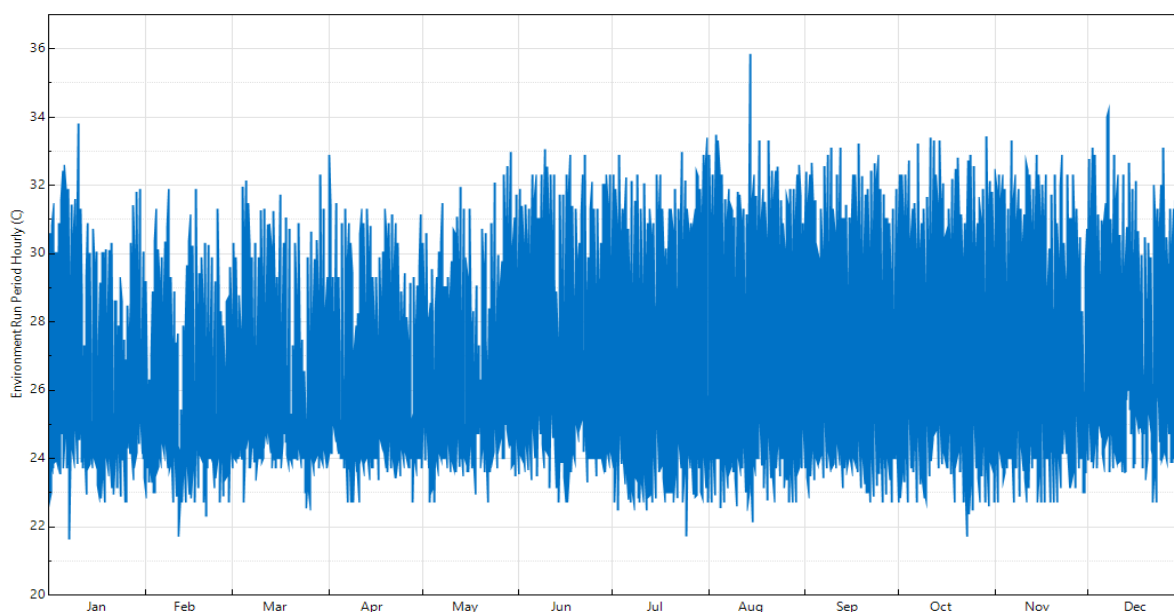
$\sigma''$  = transmissividade do vidro.

### 3.5 Variáveis ambientais importantes

#### 3.5.1 Temperatura do ar, $t_a$

Chamado de temperatura de bulbo seco do ar em volta de cada indivíduo, em °C. Sua relevância nas pesquisas de bem-estar térmico é para analisar a transferência de calor por convecção entre os indivíduos e o ambiente, a Figura 7 ilustra as temperaturas do ar seco disponibilizadas pelo arquivo climático do *EnergyPlus* com uma temperatura máxima de 35,5°C, uma mínima de 21,9°C e uma média de 26,4°C .

Figura 7 - Temperatura de bulbo seco



Fonte: Arquivos Climáticos do *EnergyPlus* (SWERA)

#### 3.5.2 Temperatura média radiante, $t_{rm}$

A  $t_{rm}$  pode ser analisada através de dados da temperatura do globo, velocidade do ar e temperatura do ar. É a temperatura uniforme de um ambiente fictício, no qual a dissipação de calor radiante corporal é igualada à dissipação de calor radiante no ambiente real não uniforme.

Para um globo negro a temperatura média radiante, é calculada, de acordo com a ASHRAE (2001), utilizando a equação:

$$t_{rm} = [(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \cdot V_a^{0,6} \cdot (t_g - t_a)}{\varepsilon D^{0,4}} \cdot (t_g - t_a)]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (3.7)$$

onde:

$t_{rm}$  = temperatura média radiante, °C;

$t_g$  = temperatura de globo, °C;

$t_a$  = temperatura do ar, °C;

$V_a$  = velocidade do ar no nível do globo, m/s;

$\varepsilon$  = emissividade (0,95 para globo negro), adimensional;

$D$  = diâmetro do globo, m.

### 3.5.3 Velocidade do ar, $V_a$

No caso de regiões marítimas, durante o dia, o movimento do ar acontece do mar para a terra, e durante a noite, da terra para o mar. Isto se deve ao fato da terra se aquecer mais facilmente que a água. Portanto, durante o dia, o ar próximo ao solo se aquecerá, subirá e permitirá o movimento do ar fresco do mar para a terra. Durante a noite, a terra esfria mais facilmente e a água que armazena o calor durante o dia, aquece o ar próximo permitindo a sua subida e a substituição pelo ar fresco vindo da terra. O vento é também influenciado pela altitude, pela topografia e pela rugosidade do solo. É Utilizada a  $V_a$  nas pesquisas de conforto térmico para a análise de transferência de calor por evaporação e convecção.

### 3.5.4 Umidade do ar

A umidade do ar expressa a quantidade de vapor de água encontrada na atmosfera informando se o ar é úmido ou seco variando conforme o tempo. Pode ser calculada pela equação da pressão parcial de vapor de água do ar,  $p_a$ , (ASHRAE, 2001):

$$p_a = UR p_{sat}(t_a) \quad (3.8)$$

com:

$$p_{sat}(t_a) = 1000 \exp [16,6536.(4030,183 / (t_a + 235))] \quad (3.9)$$

onde:

$p_a$  = pressão parcial de vapor d'água do ar, Pa;

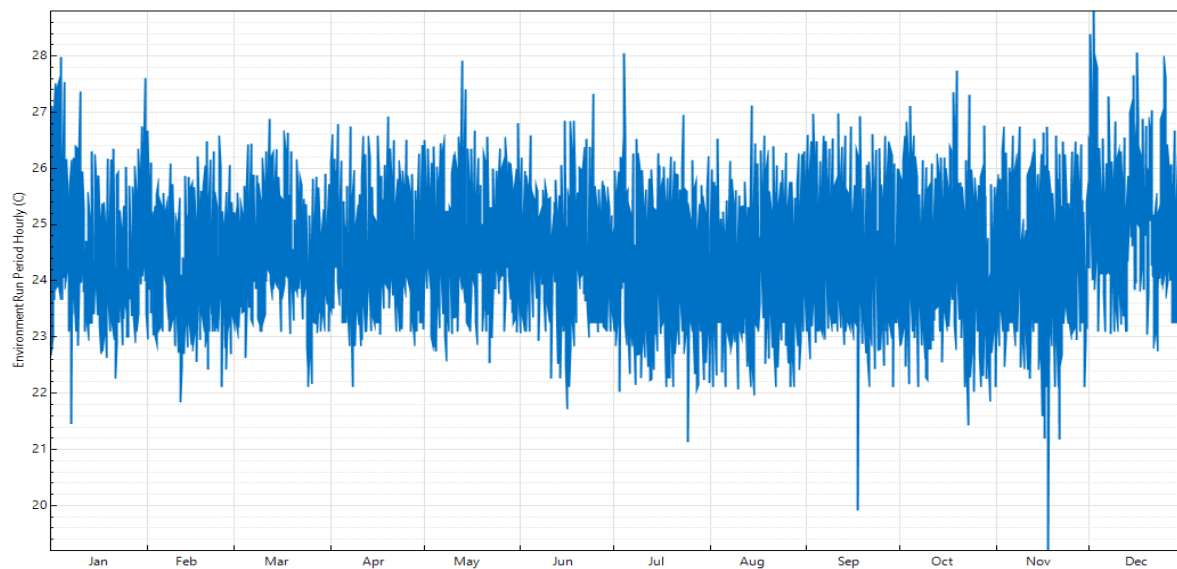
$UR$  = umidade relativa, entre 0 e 1;

$p_{sat}$  = pressão de saturação, Pa;

$t_a$  = temperatura do ar, °C.

A Figura 8 ilustra a umidade no ar conforme os arquivos climáticos disponibilizados pelo *site* do *EnergyPlus*, com uma máxima de 29 °C, mínima de 19 °C e uma média de 24°C.

Figura 8 - Temperatura do ar úmido

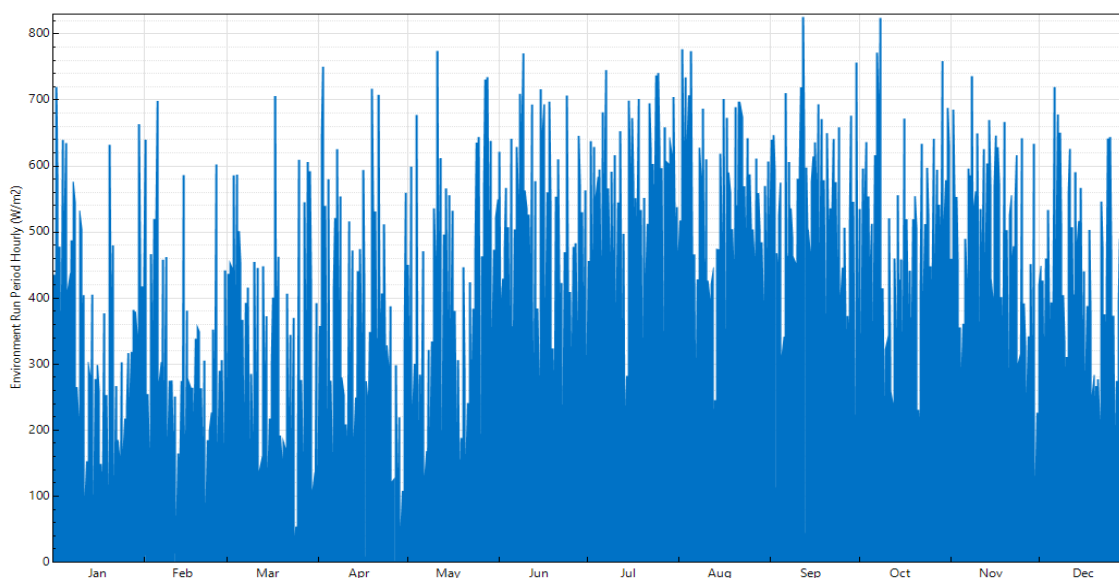


Fonte: Arquivos Climáticos do *EnergyPlus* (SWERA)

### 3.5.5 Radiação solar

A radiação direta, como diz o próprio nome, é a parcela que atinge diretamente a terra, a Figura 9 ilustra uma transmissão de energia máxima de 810,5 W/m<sup>2</sup> e média de 128,9 W/m<sup>2</sup>.

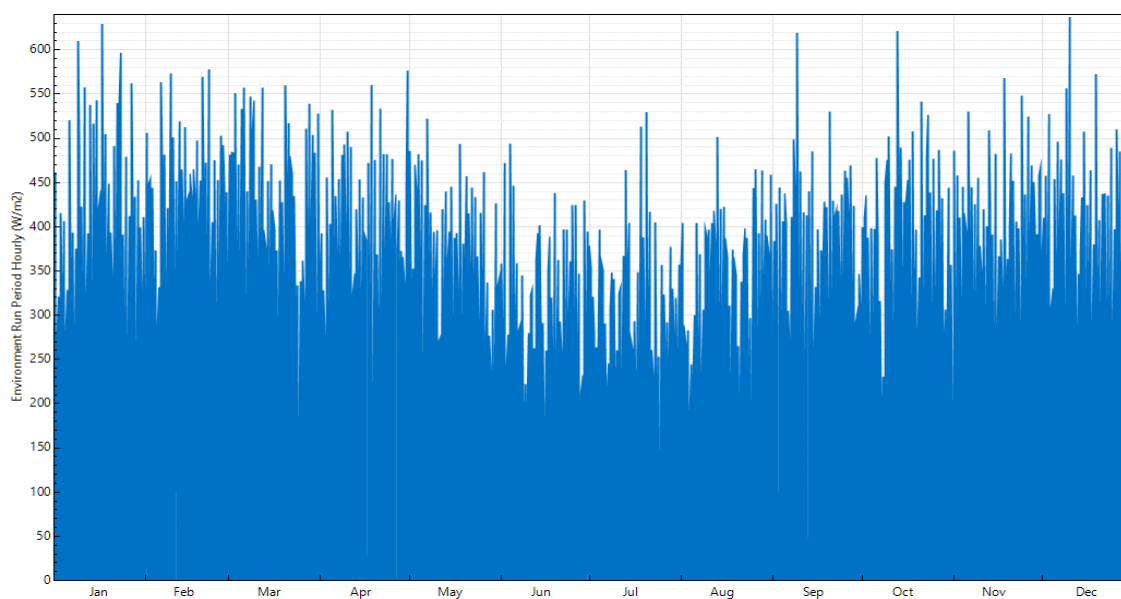
Figura 9 - Radiação solar direta por área.



Fonte: Arquivos Climáticos do *EnergyPlus* (SWERA)

A radiação difusa é a parcela que sofre um espalhamento pelas nuvens e pelas partículas da atmosfera, sendo refletida na abóbada celeste e nas nuvens e irradiada para a terra. Um céu muito nublado pode apresentar uma parcela de radiação difusa maior que a parcela direta, enquanto o céu claro, sem nuvens, apresenta uma parcela maior da radiação direta, a Figura 10 informa uma transmissão de energia máxima de 625,5 W/m<sup>2</sup> e média de 117,1 W/m<sup>2</sup>.

Figura 10 - Radiação solar difusa por área



Fonte: Arquivos Climáticos do *EnergyPlus* (SWERA)

### 3.6 Variáveis pessoais e fisiológicas

#### 3.6.1 Taxa metabólica

É o índice de energia gasta pelo esforço corporal humano. A taxa metabólica varia conforme a atividade desenvolvida pela pessoa. Através da equação podemos encontrar dados sobre o metabolismo (ASHRAE, 2001).

$$M = \frac{21(0,23RQ + 0,77)Qo2}{Ad} \quad (3.10)$$

onde:

$M$  = taxa metabólica, W/m<sup>2</sup>;

$RQ$  = quociente de respiração, adimensional;

$Q_{O_2}$  = taxa volumétrica de consumo de Oxigênio à 0°C e P = 101.325 kPa, L/s;  
 $Ad$  = área de DuBois, m<sup>2</sup>.

É expresso em W/m<sup>2</sup>, referida à área superficial corporal, para o cálculo da área é utilizado a equação sugerida por DuBois (1916), equação:

$$Ad = 0,202m^{0,425}h^{0,725} \quad (3.11)$$

onde:

$Ad$  = área de DuBois, m<sup>2</sup>;

$m$  = massa do corpo, kg;

$h$  = altura, m.

### 3.6.2 Resistência térmica das vestimentas, $I_{cl}$

As roupas dos seres humanos resistem às trocas de calor sensíveis entre o corpo e o ambiente estimado, isolando termicamente a pele é expressa em m<sup>2</sup>K/W ou em “clo”, sendo que 1 clo equivale à 0,155 m<sup>2</sup>K/W (ASHRAE, 2001).

A  $I_{cl}$  é determinada através da equação:

$$I_{cl} = 0,835 \sum I_{clu} + 0,161 \quad (3.12)$$

onde:

$I_{cl}$  = resistência térmica das vestimentas.

$I_{clu}$  = resistência térmica parcial dos componentes das vestimentas.

Os dados de  $I_{clu}$  são tabelados e representando a resistência de cada tipo diferente de vestimenta utilizada.

No caso de determinado tipo de roupa não está tabelada usa-se a equação disponibilizada pela ASHRAE, 2001:

$$I_{clu} = (0,534 + 0,135x_f)(Ag / Ad) - 0,0549 \quad (3.13)$$

onde:

$x_f$  = espessura da roupa, mm;

$A_g$  = superfície do corpo coberta, m<sup>2</sup>;

$A_d$  = área de DuBois, m<sup>2</sup>.

A equação abaixo calcula o isolamento térmico de um indivíduo sentado que está em "repouso".

$$\Delta I_{cl} = (0,748A_{ch}) - 0,1 \quad (3.14)$$

onde:

$A_{ch}$  = área de contato entre a pessoa e a superfície em questão, m<sup>2</sup>.

Na Tabela 1 que são listadas as vestimentas utilizadas pelas pessoas com seus respectivos  $I_{clu}$ , os valores de  $I_{clu}$  foram retirados da ASHRAE, (2001).

Tabela 1 - Resistências térmicas parciais das vestimentas utilizadas.

Vestimenta	$I_{clu}$ (clo)
Cueca	0,04
Camiseta	0,08
Meia barriga da perna	0,03
Chinelo	0,03
Sapato	0,10
Calção curto	0,08
Bermuda	0,15
Camisa manga curta	0,19
Camisa manga longa	0,25
Calça grossa	0,28
Calça de lã	0,30
Blusão grosso	0,36

ASHRAE, (2001)

### 3.6.3 Temperatura da pele, $t_{sk}$

Podem interferir no balanço térmico e na condição de conforto térmico de um indivíduo. A temperatura de pele,  $t_{sk}$ , é ligada diretamente ao tipo atividade exercida por cada pessoa, dependendo da taxa metabólica, ou seja, a temperatura da pele decresce com o crescimento da taxa metabólica por conta da transpiração, de acordo com a equação abaixo:

$$t_{sk,m} = 35,7 - 0,0275M \quad (3.15)$$

onde:

$t_{sk,m}$  = temperatura média da pele para conforto, °C;

$M$  = taxa metabólica, W/m<sup>2</sup>.

### 3.6.4 Taxa de secreção de suor, $E_{trsp}$

Unido a temperatura da pele, também é em função das atividades exercidas e do metabolismo e pode interferir no conforto e balanço térmico. Pode-se estimar a taxa de secreção do suor utilizando a equação abaixo:

$$E_{trsp} = 0,42[(M - W) - 58,15] \quad (3.16)$$

onde:

$E_{trsp}$  = taxa de secreção de suor, W/m<sup>2</sup>;

$M$  = taxa metabólica, W/m<sup>2</sup>.

## 3.7 Balanço Térmico

O balanço térmico é um diagnóstico do nível de desempenho energético a partir do quantitativo de todas as entradas e saídas de calor em determinado ambiente de estudo. De acordo com Fanger (1970), para que um indivíduo esteja em um ambiente térmico agradável deve haver o equilíbrio no balanço térmico. O bem-estar térmico de uma pessoa vai de acordo com as trocas de calor com o ambiente e como elas ocorrem.

O calor líquido produzido por um indivíduo,  $Q$ , é transposto para o ambiente onde se encontra através da camada inicial da pele,  $Q_{sk}$ , e por meio da respiração,  $Q_{res}$ . A perda

sensível pela pele,  $S_{sk}$ , é igual à soma da transferência de calor por radiação,  $R$ , e convecção,  $C$ , na camada externa dos indivíduos.

A perda de calor latente pela pele,  $E_{peb}$ , é dividida em: taxa de calor dissipado na evaporação da transpiração,  $E_{trsp}$ , e taxa de calor dissipado por difusão de água pela pele,  $E_{dif}$ . O calor perdido pela respiração,  $Q_{res}$ , pode se dar através de dois fluxos: fluxo de calor sensível durante a respiração,  $C_{res}$ , e o fluxo de calor latente devido à evaporação da umidade,  $E_{res}$ .

O equacionamento de Balanço Térmico, segundo a ASHRAE (2001), é ilustrado abaixo:

$$Q = M - W = Q_{sk} + Q_{res} = (C + R + E_{trsp} + E_{dif}) + (C_{res} + E_{res}) \quad (3.17)$$

onde:

$Q$  = calor líquido dissipado,  $W/m^2$ ;

$M$  = taxa metabólica de produção de calor,  $W/m^2$ ;

$W$  = taxa de trabalho externo realizado,  $W/m^2$ ;

$Q_{sk}$  = taxa total de perda de calor através da pele,  $W/m^2$ ;

$Q_{res}$  = taxa total de perda de calor através da respiração,  $W/m^2$ ;

$C + R$  = perdas de calor sensível pela pele por convecção e por radiação,  $W/m^2$ ;

$E_{trsp}$  = taxa de perda de calor latente por evaporação da transpiração,  $W/m^2$ ;

$E_{dif}$  = taxa de perda de calor latente por difusão de água pela pele,  $W/m^2$ ;

$C_{res}$  = taxa de perda de calor sensível durante a respiração,  $W/m^2$ ;

$E_{res}$  = taxa de perda de calor evaporativo durante a respiração,  $W/m^2$ .

Os termos parciais da expressão acima, 3.17, podem ser escritos em função das variáveis ambientais, conforme as equações abaixo:

$$E_{dif} = 3,05[5,73 - 0,007(M - W)p_a] \quad (3.18)$$

$$E_{trsp} = 0,42[(M - W) - 58,15] \quad (3.19)$$

$$E_{res} = 0,0173M(5,87 - p_a) \quad (3.20)$$

$$C_{res} = 0,0014M(34 - t_a); \quad (3.15) \quad C = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (3.21)$$

$$R = 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] \quad (3.22)$$

$$t_{cl} = t_{sk,m} - 0,155 \cdot I_{cl} \{ 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (3.23)$$

onde:

$M$  = taxa metabólica, W/m<sup>2</sup>;

$W$  = trabalho externo realizado, W/m<sup>2</sup>;

$p_a$  = pressão parcial de vapor d'água do ar, Pa;

$t_a$  = temperatura do ar, °C;

$f_{cl}$  = fator de vestimenta, adimensional;

$h_c$  = coeficiente de convecção, W/m<sup>2</sup> °C;

$t_{cl}$  = temperatura exterior da vestimenta, °C;

$t_{rm}$  = temperatura média radiante, °C;

$I_{cl}$  = resistência térmica das vestimentas, clo;

$t_{sk,m}$  = temperatura média da pele, °C.

Para calcular as equações acima, deve-se levar em consideração as seguintes hipóteses empíricas retiradas dos trabalhos de Fanger (1990):

$$h_c = 2,38(t_{cl} - t_a) \text{ ou;} \quad (3.24)$$

$$h_c = 12,1(V_a + 0,0052(M - 58))^{1/2} \quad (3.25)$$

$$f_{cl} = 1 + 0,2I_{cl} \text{ ou;} \quad (3.26)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1I_{cl} \quad (3.27)$$

onde:

$h_c$  = coeficiente de convecção, W/m<sup>2</sup> °C;

$t_{cl}$  = temperatura exterior da vestimenta, °C;

$t_a$  = temperatura do ar, °C;

$V_a$  = velocidade do ar, m/s;

$M$  = taxa metabólica, W/m<sup>2</sup>;

$f_{cl}$  = fator de vestimenta, adimensional;

$I_{cl}$  = resistência térmica das vestimentas, clo;

Deve-se sempre escolher o maior valor de  $h_c$  entre as equações 3.24 e 3.25. Utilizam-se a equação 3.26 para  $I_{cl}$  entre 0,0 e 0,5 clo e a equação 3.27 quando  $I_{cl} > 0,5$  clo.

### 3.8 Índices de Conforto Térmico

#### 3.8.1 Voto Médio Previsto, $PMV$

Proveniente das pesquisas de Fanger (1970), o  $PMV$  é estipulado por meio do metabolismo das pessoas e da carga térmica que atua no corpo. O cálculo do  $PMV$  é expressado na equação abaixo:

$$PMV = [0,303exp(-0,036.M) + 0,028]L \quad (3.28)$$

onde:

$PMV$  = voto médio previsto;

$M$  = metabolismo, W/m<sup>2</sup>;

$L$  = acumulação de energia, W/m<sup>2</sup>.

O  $PMV$  representa a sensação térmica, utilizando uma escala de sete ou nove pontos, de acordo com ASHRAE, (2001).

Tabela 2 - Escala de sensação térmica de nove pontos.

Valor da Sensação Térmica ( $PMV$ )	Descrição
+4	Muito quente
+3	Quente
+2	Morno
+1	Levemente morno

0	Neutro
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Gelado
-4	Muito gelado

Fonte: Fanger (1970)

### 3.8.2 Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas, *PPD*

O *PPD* relata o quantitativo de pessoas insatisfeitas com a temperatura do ambiente, baseado no *PMV* com valores de +4, +3, +2, -2, -3 e -4.

A equação do *PPD* é ilustrada abaixo:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)] \quad (3.29)$$

onde:

*PPD* = porcentagem de pessoas insatisfeitas, adimensional;

*PMV* = voto médio previsto.

Mesmo que um *PMV* seja nulo, ainda existirá 5% de pessoas insatisfeitas, representando a neutralidade do *PMV*.

### 3.9 Metodologia de Cálculo base do *EnergyPlus*

O método de cálculo da zona térmica da edificação no *EnergyPlus* está baseado no modelo de balanço de calor. O Módulo de Balanço de Calor na superfície simula o balanço nas superfícies internas e externas, faz as conexões entre os balanços de calor e as condições de fronteira, e calcula a condução, a convecção, a radiação e a transferência de massa.

Pedersen (2002), considera que o ar em cada zona térmica pode ser modelado como bem agitado com temperatura uniforme. Outras principais suposições dos modelos de calor levam em consideração que superfícies como paredes, janelas, tetos e pisos têm: Temperaturas de superfícies uniformes; Irradiação por ondas curtas e longas uniformes; superfícies radiantes difusas e condução de calor em uma dimensão.

Conforme Strand (2002), para realizar o cálculo da condução através das paredes o programa *EnergyPlus* utiliza as Funções de Transferência de Condução (*CTFs*). Através das

equações (3.30) e (3.31) determina-se respectivamente o fluxo de calor da face interna para a externa da parede ( $q''_{Ki}$ ) e da externa para a interna ( $q''_{Ko}$ ):

$$q''_{Ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=i}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=i}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=i}^{nb} \phi_j q''_{ki-j\delta} \quad (3.30)$$

$$q''_{Ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=i}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=i}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=i}^{nb} \phi_j q''_{ko-j\delta} \quad (3.31)$$

onde:

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

$Y_j$  = coeficiente CTF no interior da superfície,  $j = 0, 1, \dots, nz$ ;

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

$\Phi_j$  = coeficiente CTF de fluxo,  $j = 0, 1, \dots, nb$ ;

$T_i$  = temperatura no lado interno da face;

$T_o$  = temperatura no lado externo da face;

$q''_{Ki}$  = fluxo de calor da face interna para a externa da parede;

$q''_{Ko}$  = fluxo de calor da face externa para a interna da parede.

Para o balanço de calor nas superfícies externas é utilizada a equação 3.32:

$$q''_{asol} + q''_{Lwr} + q''_{conv} - q''_{Ko} = 0 \quad (3.32)$$

onde:

$q''_{asol}$  = fluxo de radiação externa por ondas curtas;

$q''_{Lwr}$  = fluxo de radiação externa por ondas longas;

$q''_{conv}$  = fluxo de calor na convecção externa;

$q''_{Ko}$  = fluxo de calor por condução da face externa para a face interna da parede.

Quanto ao balanço de calor interno, a seguinte equação é utilizada:

$$q''_{Lwx} + q''_{sx} + q''_{Lws} + q''_{Ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (3.33)$$

onde:

$q''_{Lwx}$  = troca de radiação por ondas longas entre as superfícies da zona;

$q''_{Lws}$  = fluxo de radiação por ondas longas vindas de fontes internas;

$q''_{sx}$  = fluxo de radiação por ondas curtas vindo das luzes;

$q''_{Ki}$  = fluxo de calor por condução da face interna para a externa na parede;

$q''_{sol}$  = fluxo de radiação solar;

$q''_{conv}$  = fluxo de convecção.

Segundo o *Department of Energy U.S.* (2022), a base para a integração das zonas e do sistema de ar é formular balanços de energia para a zona de ar e resolver as equações diferenciais ordinárias resultantes. A formulação do esquema de solução começa com um balanço de calor no ar da zona, como ilustra a equação 3.35 abaixo:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + Q_{sys} \quad (3.34)$$

onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  = energia armazenada na zona de ar;

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i$  = soma das cargas internas convectivas;

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  = transferência de calor por convecção das superfícies para as zona;

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z)$  = transferência de calor devido à mistura de ar entre zonas;

$m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  = transferência de calor devido à infiltração de ar externo

$Q_{sys}$  = sistemas de saída de ar

$C_z = \rho_{air} C_p C_T$

$\rho_{air}$  = densidade do ar na zona;

$C_p$  = calor específico do ar na zona;

$C_T$  = multiplicador de capacidade de calor sensível.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Parâmetros de análise

A análise térmica do auditório leva em consideração a influência dos próprios dados meteorológicos da região (Belém-PA) e suas variáveis estruturais que afetam a temperatura do ambiente estudado, também averiguou-se como a temperatura do auditório se comportaria com a ocupação máxima de pessoas (184) levando em consideração suas vestes.

O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), juntamente com o INPE e LABSOLAR/UFSC, disponibilizou arquivos climáticos para 20 cidades brasileiras, e uma dessas capitais foi Belém do Pará, esse arquivo climático é disponibilizado pelo próprio *EnergyPlus* em sua página da internet.

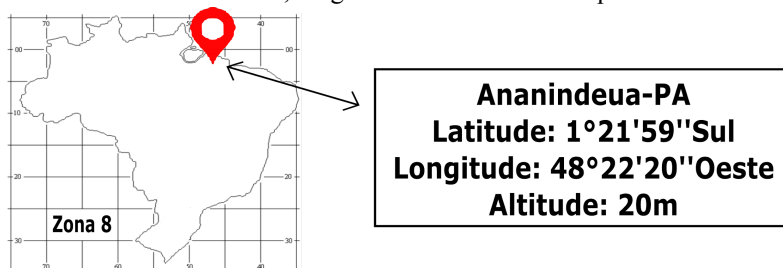
O estudo no auditório foi realizado no ano de 2021, analisou-se para cada mês do ano 28 dias “corridos”, por 24 horas diárias. Com isso, coletou-se todos os dados estruturais e pessoais necessários para a simulação.

O presente trabalho concentra-se no estudo da temperatura do ar dentro do auditório que é de fato a sensação térmica sentida pelos frequentantes, a zona de temperatura do ar no auditório se caracteriza pela influência de variáveis estruturais e meteorológicas que emitem energia para a zona térmica do auditório, alguns resultados climáticos e dos materiais também foram expressos, como por exemplo a temperatura de bulbo seco e úmido e a radiação solar transmitida das janelas para o auditório.

### 4.2 Ananindeua

O auditório se encontra na cidade de Ananindeua, bairro do Icuí, a temperatura de Ananindeua é bem semelhante a de Belém pelo fato de ser uma região metropolitana da cidade, e o formato climático aceito pelo *EnergyPlus* só encontra-se para a cidade de Belém, portanto a análise do edifício se dá com os arquivos climáticos de Belém-PA.

Figura 11 – Dados de latitude, longitude e altura do município de Ananindeua/PA

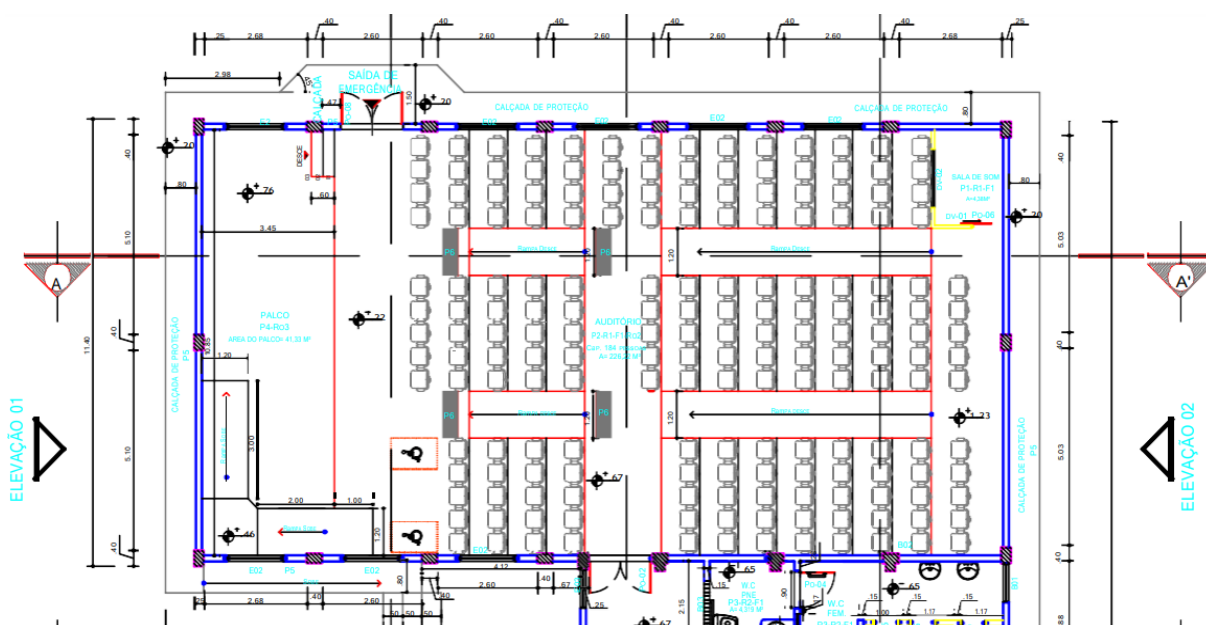


Fonte: Adaptado de Pozza, (2011)

### 4.3 Dados estruturais

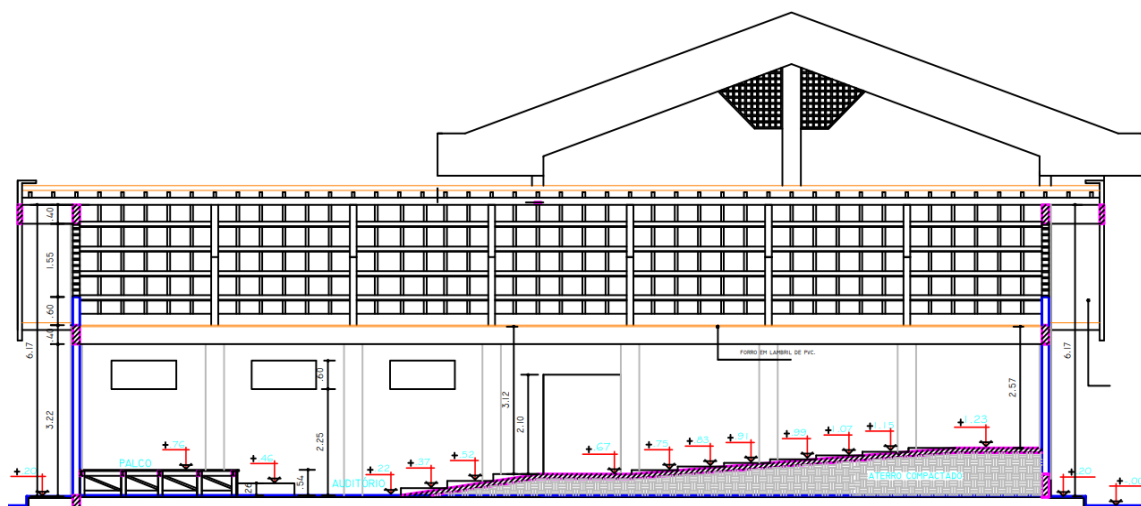
Nas Figuras 13 e 14 abaixo tem-se as dimensões do auditório estudado, com um comprimento total de 21,25 m, largura de 11,40 m e altura de 6,17 m e uma área total de 226,22 m<sup>2</sup>, onde possui 2 portas e 8 janelas, pode-se observar os materiais construtivos do auditório de uma forma clara na Tabela 3, a Figura 13 ilustra que dentro do auditório possui uma sala de som onde seu material estrutural fez parte da simulação, mas adotou-se o auditório como uma única zona térmica estrutural.

Figura 12 - Projeto Arquitetônico Planta Baixa Biblioteca / Auditório



Fonte: Arquiteto Célio Otávio Pereira da Silva. CAU N° A 16660- 0 CAU/PARÁ.

Figura 13 - Perspectiva do auditório anexo A



Fonte: Arquiteto Célio Otávio Pereira da Silva. CAU N° A 16660- 0 CAU/PARÁ.

A Tabela 3 ilustra os tipos de materiais presentes no auditório e suas dimensões:

Tabela 3 – Elementos construtivos listados na planta do projeto.

<b>PISOS</b>
P1 – Piso alta resistência tipo “KORODUR” – Granitina branca pigmentação concreto natural e resina acrílica.
P2 – Piso vinílico em placa 30x30cm, 3,2 mm de espessura.
P5 – Cimentado liso com junta plástica. (Calçada) com pintura para piso na cor concreto
P6 – Piso tátil de alerta, colagem direta, 400x400x3mm (espessura total 3mm, sendo 3mm de relevo). Confeccionado em PVC, na cor vermelha;
<b>COBERTURA</b>
Estrutura em concreto armado acabamento reboco liso.
Calha em concreto armado impermeabilizado e membrana asfáltica a frio, acabamento externo pintura na cor concreto.
Telha cerâmica tipo capa canal com subcobertura.
Rufo em concreto armado.
<b>REVESTIMENTOS</b>
R1 – Reboco liso, pintura e massa acrílica na cor palha.
R2 – Revestimento cerâmico 20x20cm, “Tipo A” na cor branco.
<b>FORROS / RODAPÉS</b>
F1 – Forro em lambril de PVC na cor branca.
Ro1 – Rodapés – Peças pré-moldadas em “KORODUR” polido/resina acrílica – ESP. 2cm. altura 8cm.
Ro2 – Rodapé em placa de laminado vinílico altura 8cm.
Ro3 – Rodapé em madeira de lei 8cm.
<b>DIVISÓRIAS</b>
Dv01- divisória tipo “drywall” 1.5x1 m
Dv01- divisória tipo “drywall” com visor 1.5x1.00 m com vidro de 6mm
<b>PORTAS E ESQUADRIAS</b>
Po-02 – Porta em vidro temperado 100mm incolor com mola nas duas folhas. Dimensões: 1,73x2,10m e soleira de granito cinza claro.

Po-07 – Porta em “MDF” 100mm revestido com laminado metálico.  
Dimensões: 0,80x2,10m tipo de correr.

Po-08 – Porta em chapa de aço galvanizada com dimensões 1,60x2,10m com pintura antiferruginosa e esmalte sintético, barra antipânico e soleira de granito cinza claro.

E02 – Esquadria em alumínio natural e vidro liso 4mm tipo basculante.  
Dimensões: 1,50x0,60 com película e peitoril de granito.

Fonte: Planta da Biblioteca/Auditório UFPA – Anexo A (2022).

Nas Tabelas 4 e 5 ilustram-se alguns dados térmicos dos materiais construtivos do auditório.

Tabela 4 – Propriedades térmicas dos materiais.

<b>Material</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Condutividade de Térmica (W/mK)</b>	<b>Densidade Equivalente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (J/KgK)</b>
<b>Piso cerâmico</b>	0,01	0,9	1600	920
<b>Argamassa de assentamento</b>	0,015	1,15	1600	1000
<b>Argamassa de gesso</b>	0,007	0,7	1200	840
<b>Reboco de argamassa</b>	0,025	1,15	1800	1000
<b>Laje de concreto</b>	0,2	1,75	2200	1000
<b>Telha cerâmica</b>	0,02	0,7	1000	920
<b>Textura acrílica</b>	0,010	0,4	1300	1000
<b>Forro PVC</b>	0,008	0,2	1200	-
<b>Porta em MDF</b>	0,025	0,2	850	2300
<b>Porta de Aço</b>	0,09	70	7800	486
<b>Janela de vidro</b>	0,6	0,9	-	-
<b>Bloco cerâmico</b>	0,100	0,9	1300	920
<b>Vidro</b>	0,01	1,0	2500	840

Fonte: 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, 2003.

Tabela 5 – Propriedades térmicas dos tipos de vidro utilizados.

Material	Fator Solar (U)	Transmitância Térmica (W/m <sup>2</sup> K)
Vidro comum	0,860	5,780
Vidro temperado	0,500	5,600

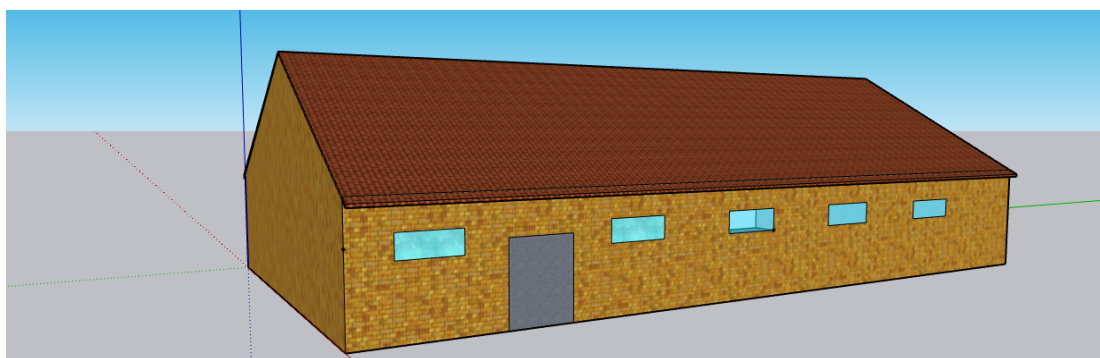
Fonte: Projeto 02:135.07-001/2. Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2003.

Com a Planta baixa do auditório, tem-se todas as informações estruturais necessárias, como nota-se nas imagens 13 e 14 e tabelas 3 e 4.

#### 4.4 Simulação

Para o cálculo de desempenho térmico do local citado, inseriu-se no *software* dados estruturais do auditório e climáticos, logo, é feita a comparação da temperatura encontrada dessas zonas térmicas com os parâmetros estabelecidos pela ISO 9241/2011 e constatando se as zonas dos meses de 2021 estão dentro dos padrões térmicos.

Um modelo virtual em formato 3D (Figura 15), foi criado usando o programa *SketchUp Make* que juntamente com o *software Openstudio*, fornece um arquivo “idf” que é aplicado no *software EnergyPlus*, que gera a simulação dos dados. O *Sketchup* é utilizado para o desenho arquitetônico do referente estudo, o *OpenStudio* é vinculado ao *software* através de um plugin externo para que o mesmo interprete dados como comprimento, altura, móveis, janelas, portas, entre outros, sem esse vínculo entre *Energyplus*, *Openstudio* e *SketchUp* a simulação seria ainda mais complexa pois as dimensões do auditório, assim como os lugares das portas, janelas, paredes e telhado deveriam ser inseridos conforme suas coordenadas cartográficas, escolhendo um ponto de referência dentro do *software Energyplus*.

Figura 14 – Auditório modelado no *software SketchUp Make 2017*

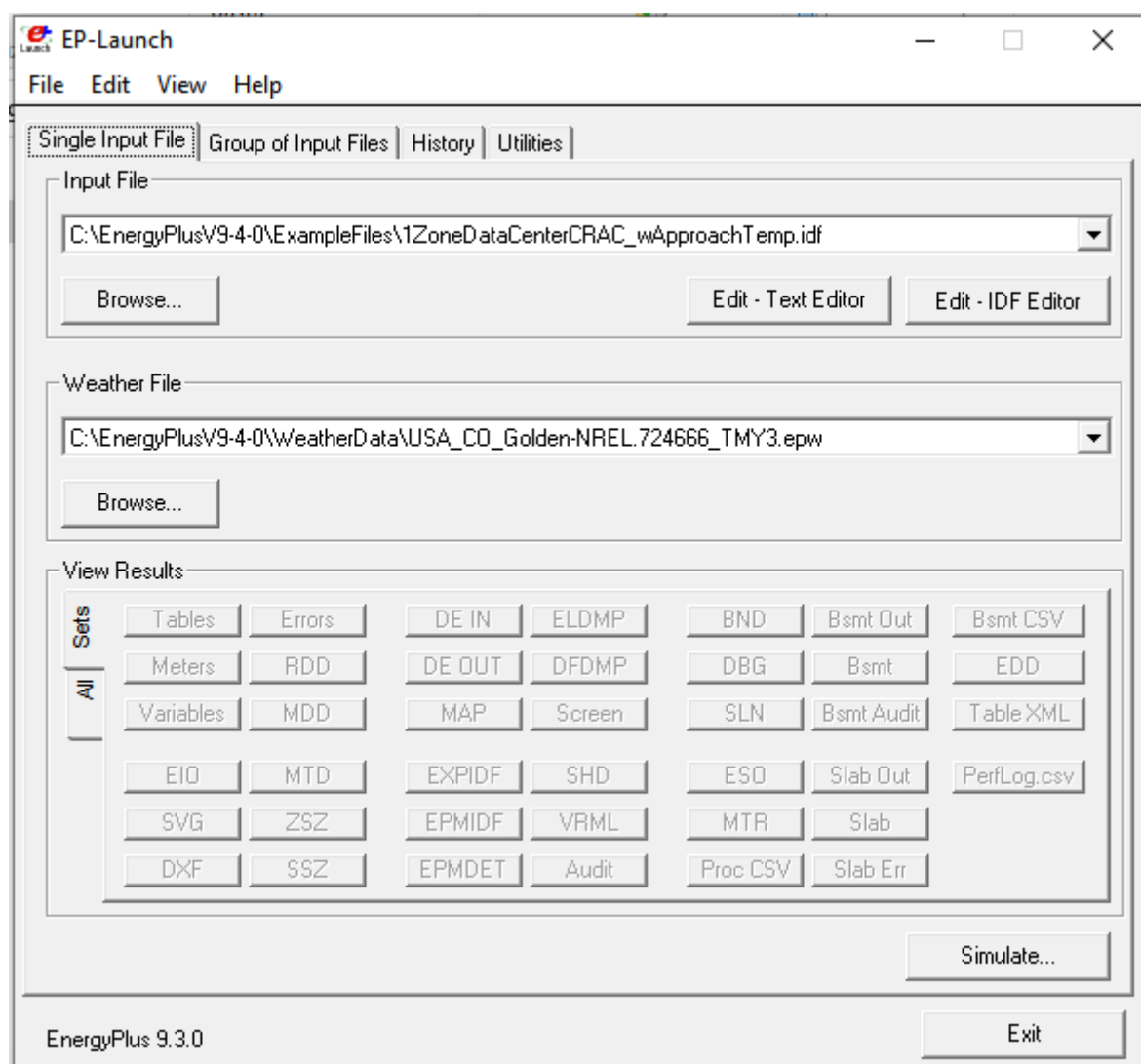
Fonte: Autor, (2022)

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

Nota-se uma interface do *EnergyPlus* com uma usabilidade complicada de se trabalhar, por conta disso vincula-se *softwares* para fazer essa ponte com o *EnergyPlus*.

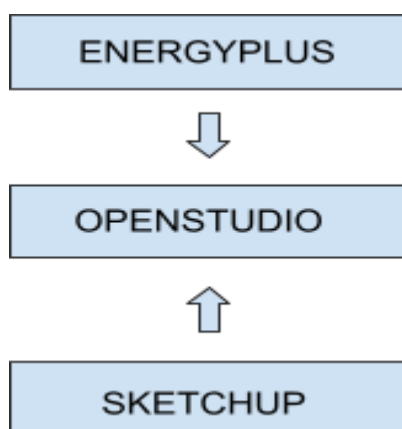
O vínculo entre os três *softwares*, permite uma otimização incrível em relação ao estudo. Onde o *OpenStudio* funciona como um gerenciador do *EnergyPlus* e *SketchUp*.

Figura 15 - Interface de simulação do *Energyplus*



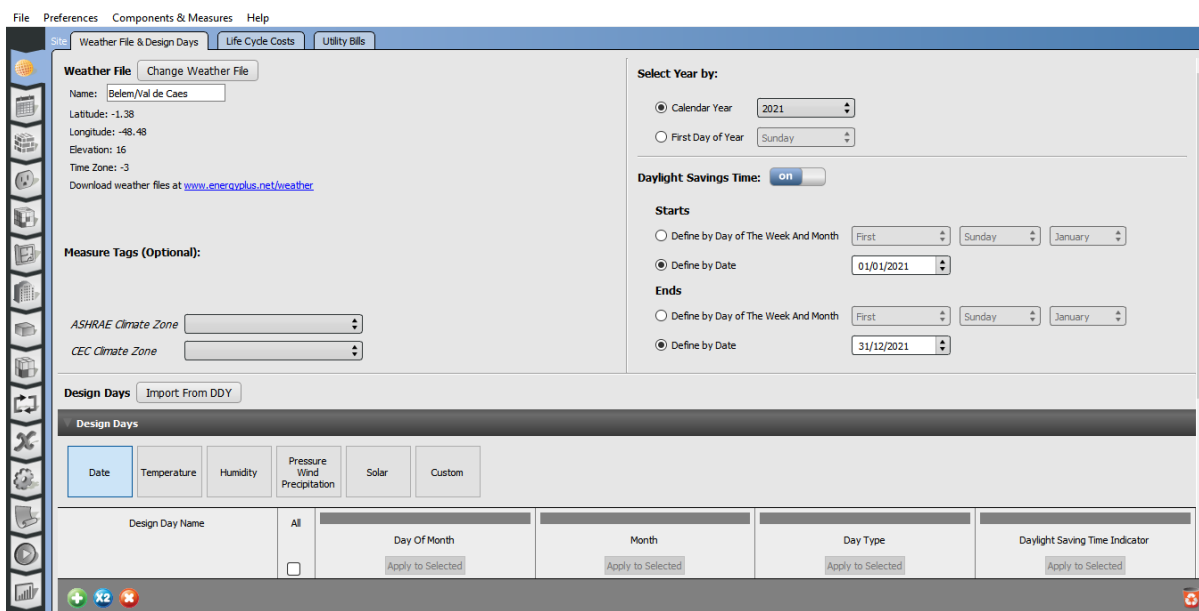
Fonte: *EnergyPlus* v9.5.0, (2022)

A junção desses três softwares é de extrema importância para o desenvolvimento da pesquisa relacionada, podemos notar que o *software* principal (*EnergyPlus*) é vinculado ao *OpenStudio* assim como o *Sketchup*, sistematizando em um único software a entrega de dados e os resultados obtidos, como ilustra a Figura 17.

Figura 16 - relação dos *softwares*

Fonte: Autoria própria, (2021)

Na aba *site* (Figura 18) adiciona-se os arquivos climáticos da região de estudo, nesse caso foram inseridos arquivos de Belém do Pará no formato SWERA (BRA\_Belem-Val.de.Caes.821930\_SWERA), referente a dados da temperatura do ar, radiação solar, entre outras variáveis térmicas.

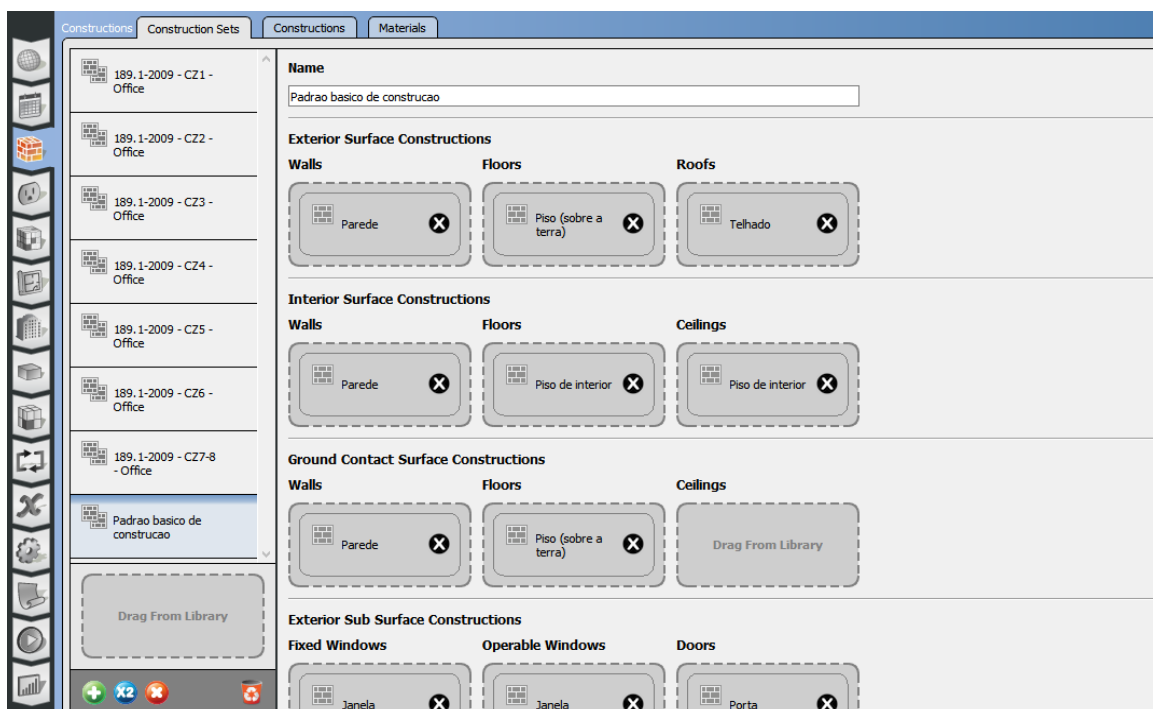
Figura 17 - Aba *site* do *Openstudio*

Fonte: *OpenStudio*, (2021)

Em seguida, pode-se considerar a aba (*constructions*) como uma das principais do *software*, nela deve-se adicionar dados referentes a construção do edifício, dados relacionados ao tipo de material, suas características térmicas e métricas, para então configurar itens do

edifício específicos e qual deles está em contato com determinado espaço do ambiente, logo podendo montar o padrão construtivo da residência de acordo com suas características dentro do simulador *OpenStudio* vinculado ao *EnergyPlus*.

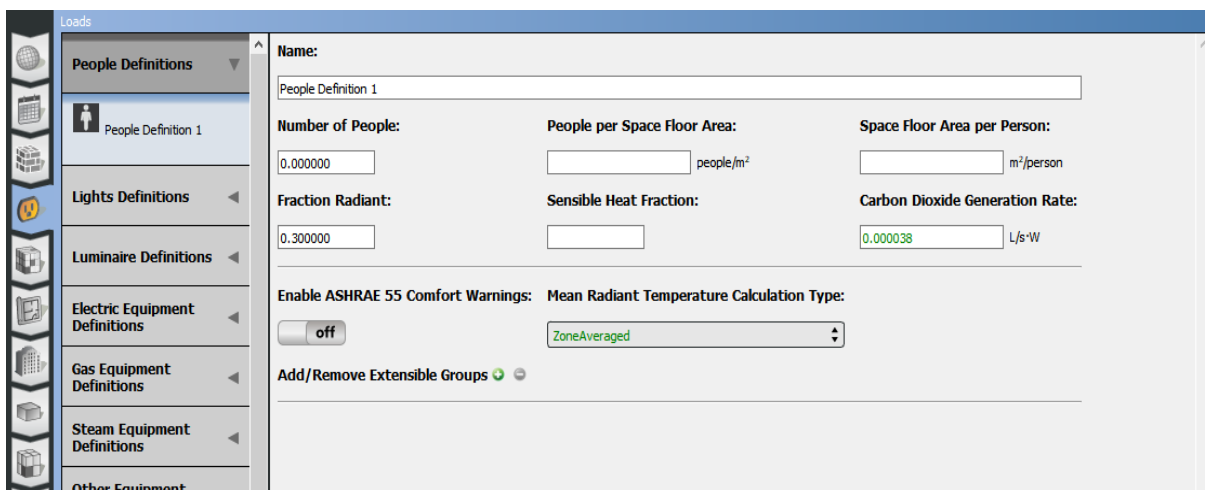
Figura 18 - Aba *constructions*



Fonte: *OpenStudio*, (2021)

Na Figura 20, a aba *loads* permite acrescentar variáveis internas no *software* com seus respectivos dados térmicos, pode-se adicionar pessoas, equipamentos, vestes, imóveis, etc.

Figura 19 - Aba *loads*

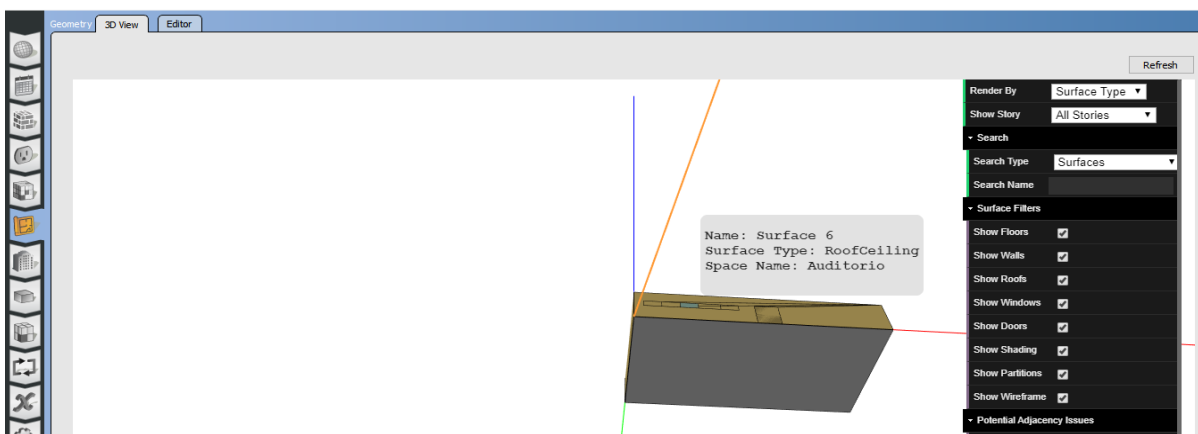


Fonte: *OpenStudio*, (2021)

Na aba *geometry* (Figura 21), pode-se visualizar o desenho arquitetônico, que ilustra as zonas térmicas selecionadas em cada quarto, assim como quais partes estão em contato com o solo, com radiações solares, com a ventilação do ambiente, entre outros.

Além de poder identificar as faces da residência e nomeá-las para uma melhor análise das zonas térmicas. Esta aba permite ter-se uma visão ampla do que está sendo feito no *software* referente ao desenho arquitetônico.

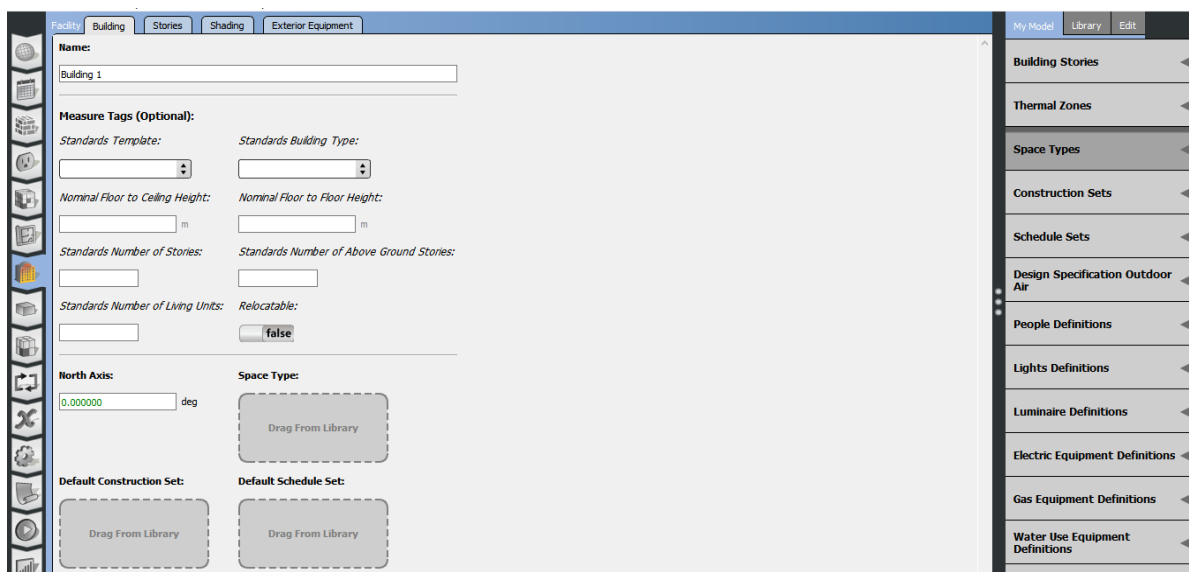
Figura 20 - Aba *geometry*



Fonte: *OpenStudio*, (2021)

Na Figura 22 (aba *facility*), a principal função desta aba é facilitar o entendimento do *software* em relação às características do ambiente como um todo, entre outras funcionalidades.

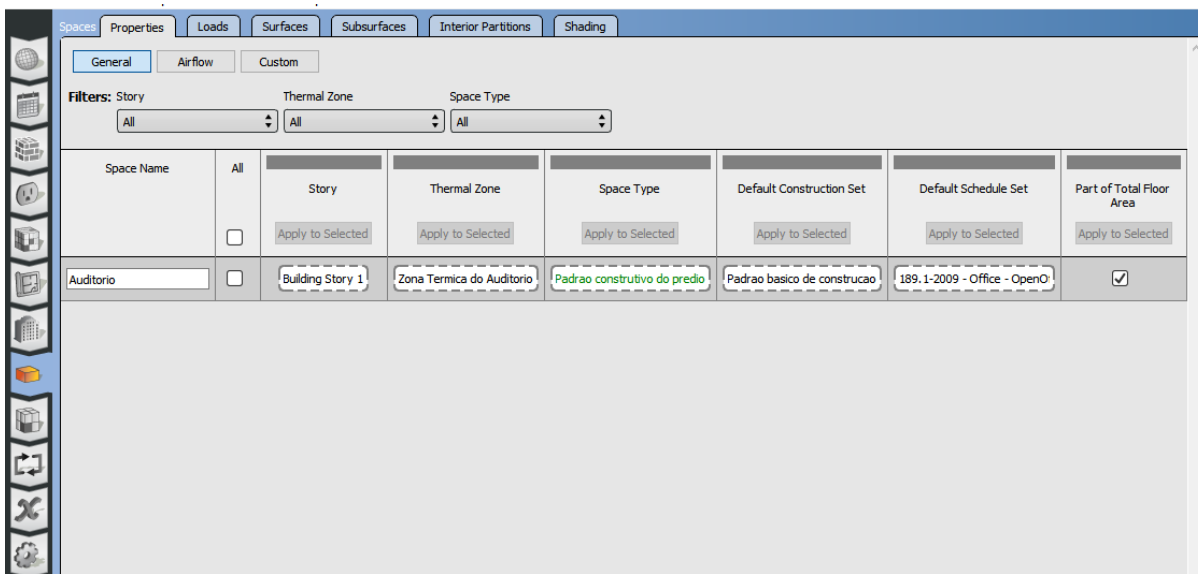
Figura 21 - Aba *Facility*



Fonte: *OpenStudio*, (2021)

Na Figura 23 (*aba spaces*), insere-se os arquivos padrões de cada local criado e especificado no *openstudio*, além de permitir modificar áreas de contatos que podem estar incorretas, entre outras funcionalidades.

Figura 22 - *Aba spaces*



Fonte: *OpenStudio*, (2021)

Na Figura 24 (*aba output variables*), escolhem-se as variáveis ambientais que se pode trabalhar, sugeridas pelo próprio *software* a fim de simplificar o estudo, foram escolhidas variáveis que detém forte impacto no desempenho térmico.

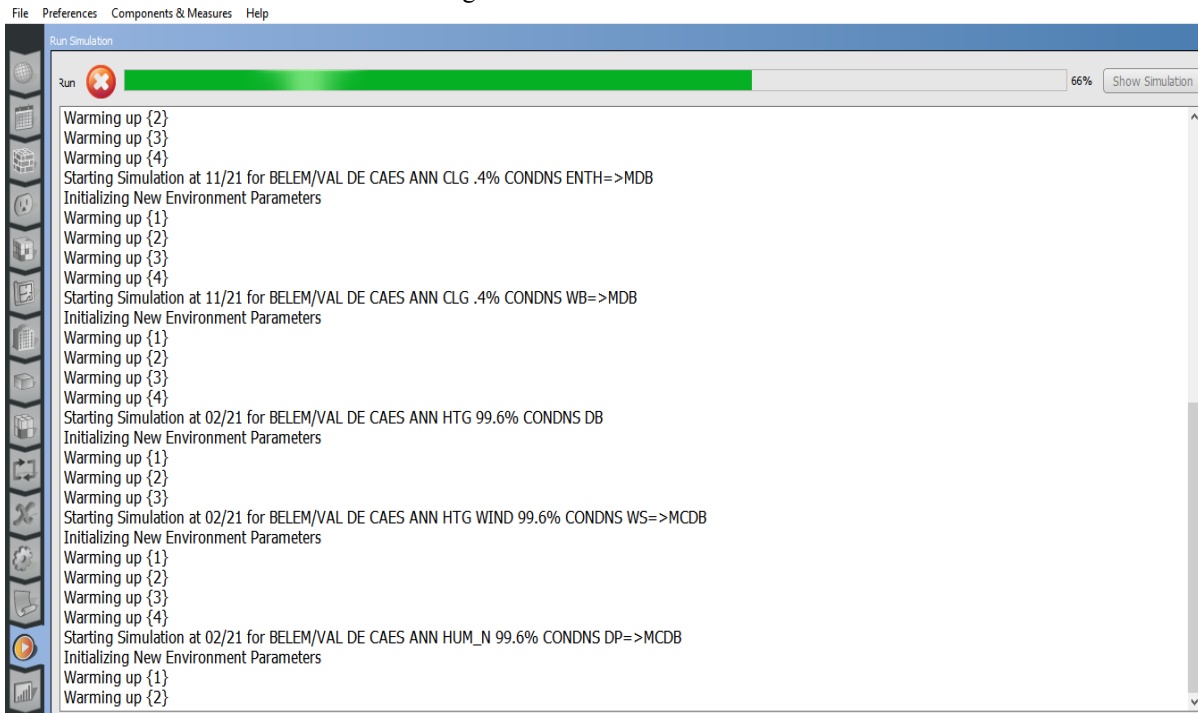
Figura 23 - *Aba output variables*



Fonte: *OpenStudio*, (2021)

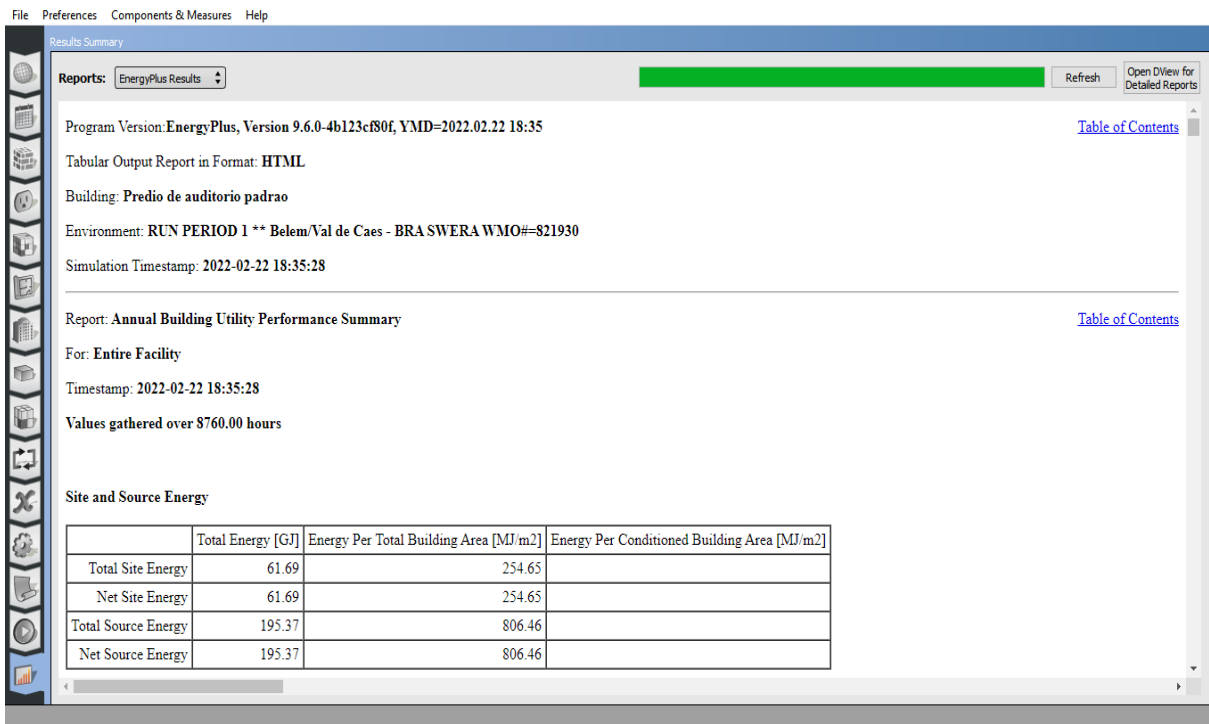
Nas Figuras 25 e 26, é a parte final da simulação, onde inicia-se a simulação e mostram-se os resultados que foram convertidos em gráficos.

Figura 24 - Aba run simulation



Fonte: *OpenStudio*, (2021)

Figura 25 - Aba results summary

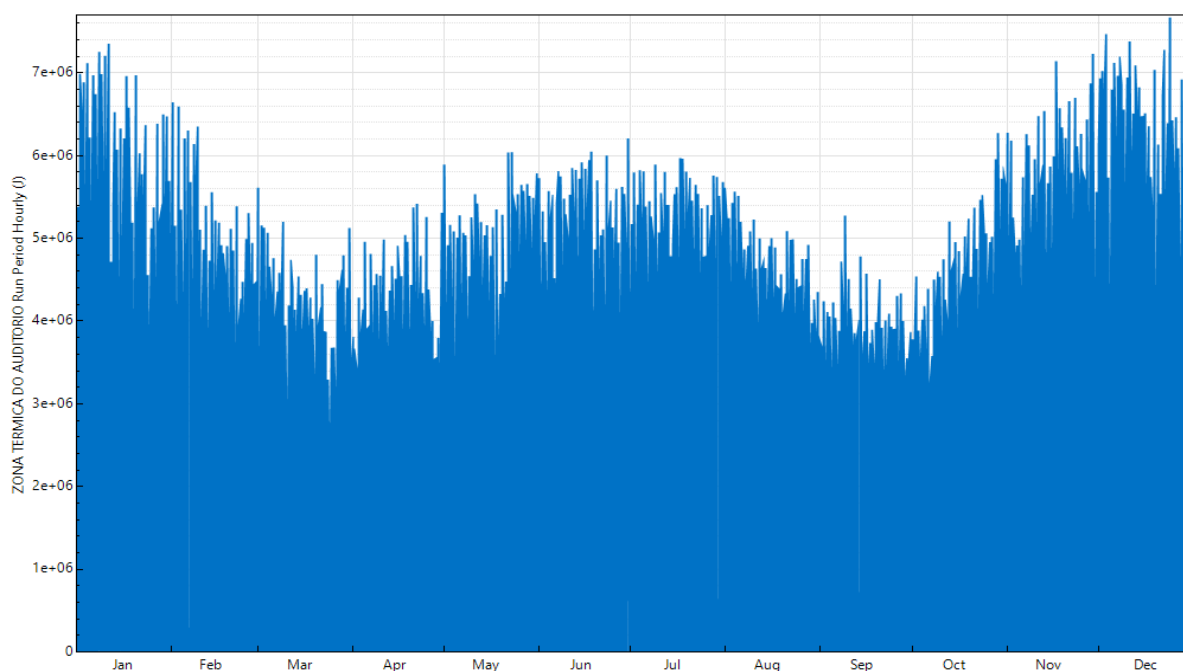


Fonte: *OpenStudio*, (2021)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 27 ilustra um desses resultados relevantes para o estudo da zona térmica do auditório, que é a taxa total de radiação solar transmitida pelas janelas para o edifício, obtendo uma média anual de 7.528.357,13 J.

Figura 26 - Transmissão total de radiação solar para o edifício pelos balancins



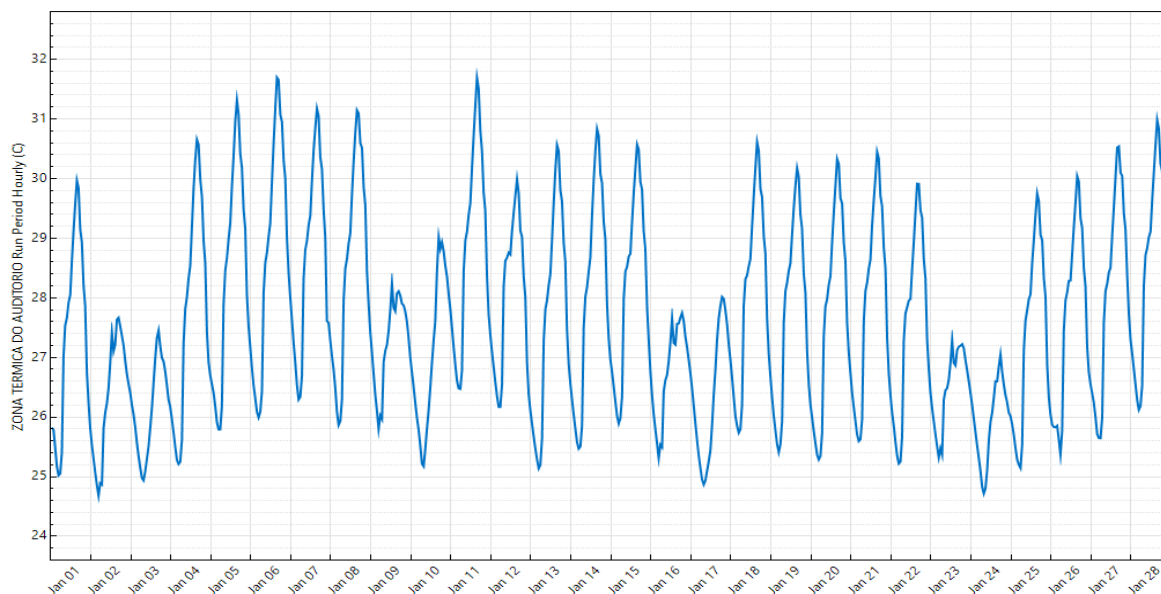
Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.1 Zona térmica de janeiro

A zona térmica do auditório como podemos notar na Figura 28, possui temperatura mínima de 24,67 °C e máxima de 31,68 °C, uma média de 27,59 °C com um desvio padrão de 1,63 °C. Nota-se que de acordo com a ISO 9241, que informa o padrão térmico de um edifício, que deve manter uma temperatura entre 20 °C até 24 °C no verão e 23°C até 26 °C no inverno. O chamado "inverno amazônico" é a denominação regional que ocorre com o período de chuva, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Ou seja, é um nome popular para justificar um período com mais nebulosidade, chuva e menores temperaturas nestas localidades, para meses com essas características irá utilizar-se a relação entre 23 °C e 26 °C.

Nota-se que nenhum dos dias estudados na simulação está dentro dos padrões térmicos.

Figura 27 - Zona térmica do auditório no mês de janeiro



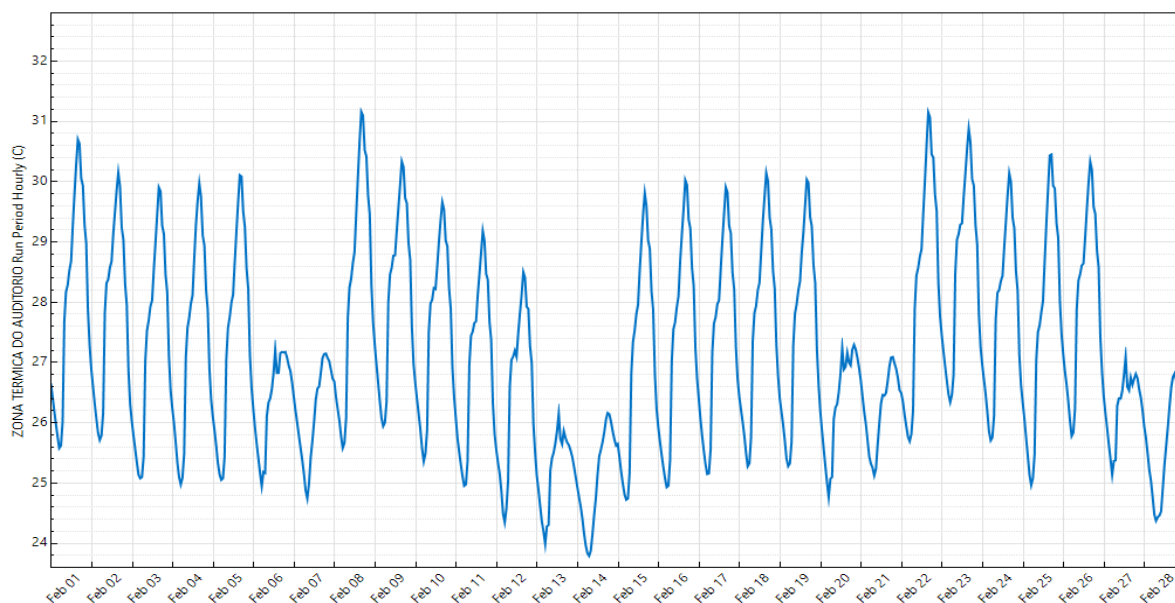
Fonte: Autoria própria, (2022)

## 5.2 Zona térmica de fevereiro

A zona térmica do auditório em fevereiro, possui temperatura mínima de 23,78 °C e máxima de 31,15 °C, uma média de 27,15 °C e um desvio padrão de 1,66 °C.

Percebe-se que os dias 13 e 14 estão próximos ao estabelecido pela ISO 9241, ultrapassaram apenas 0,2 °C dos 26 °C, adotando uma margem de erro pode-se dizer que esses dias estão dentro dos padrões térmicos.

Figura 28 - Zona térmica do auditório no mês de fevereiro

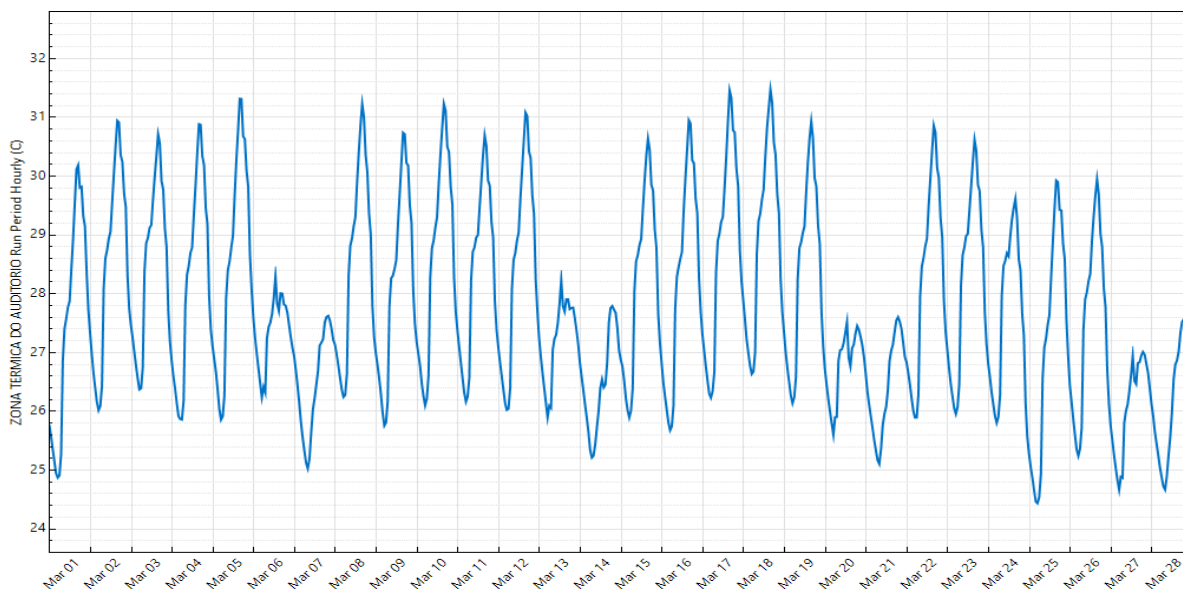


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.3 Zona térmica de março

A zona térmica do auditório em março, possui temperatura mínima de 24,42 °C e máxima de 31,46 °C, uma média de 27,8 °C com um desvio padrão de 1,67 °C.

Figura 29 - Zona térmica do auditório no mês de março

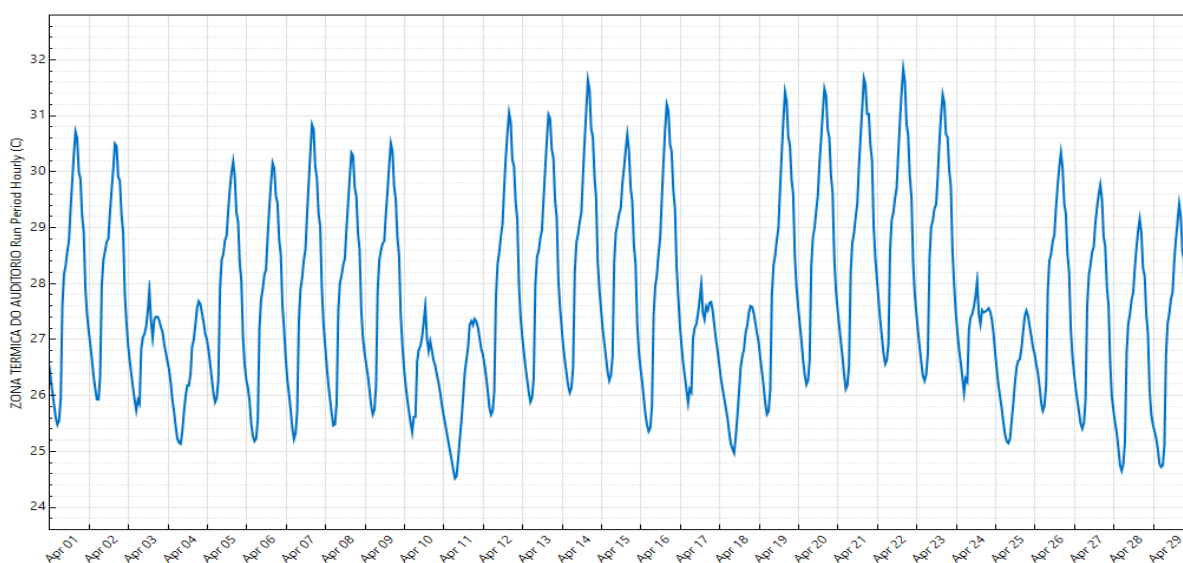


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.4 Zona térmica de abril

A zona térmica do auditório em abril, possui temperatura mínima de 24,5 °C e máxima de 31,83 °C, uma média de 27,69 °C com um desvio padrão de 1,70 °C.

Figura 30 - Zona térmica do auditório no mês de abril

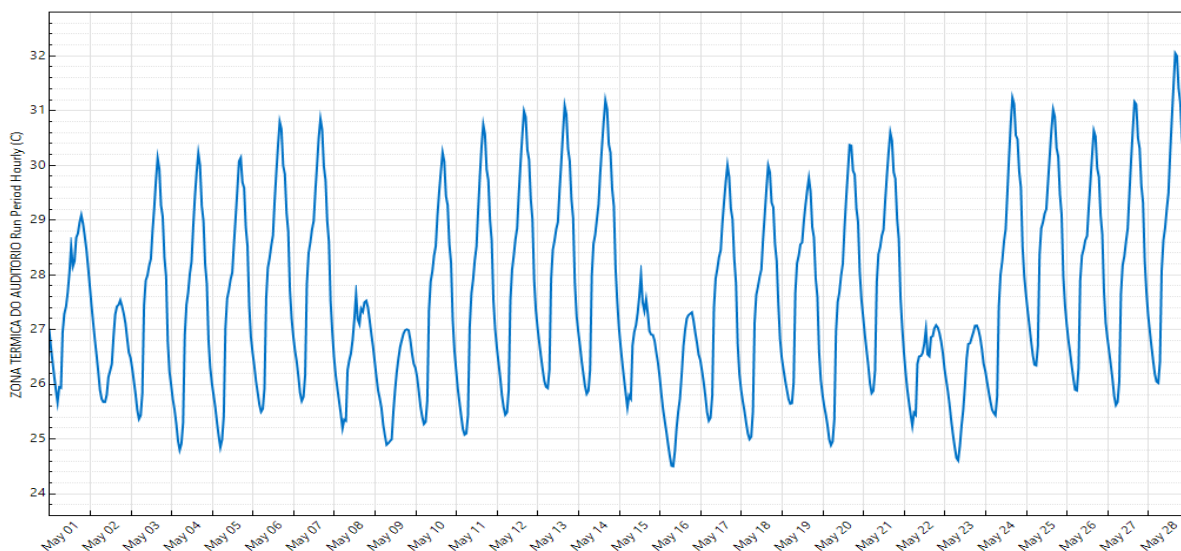


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.5 Zona térmica de maio

A zona térmica do auditório em maio, possui temperatura mínima de 24,49 °C e máxima de 32,04 °C, uma média de 27,5 °C com um desvio padrão de 1,67 °C.

Figura 31 - Zona térmica do auditório no mês de maio

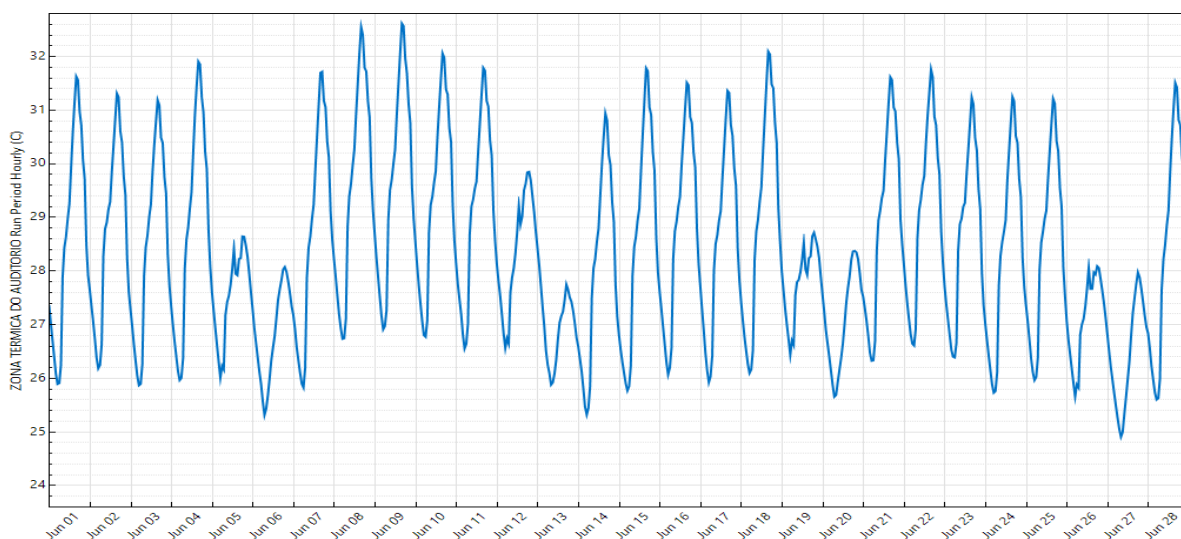


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.6 Zona térmica de junho

A zona térmica do auditório em junho, possui temperatura mínima de 24,90 °C e máxima de 32,6 °C, uma média de 28,4 °C com um desvio padrão de 1,81 °C.

Figura 32 - Zona térmica do auditório no mês de junho

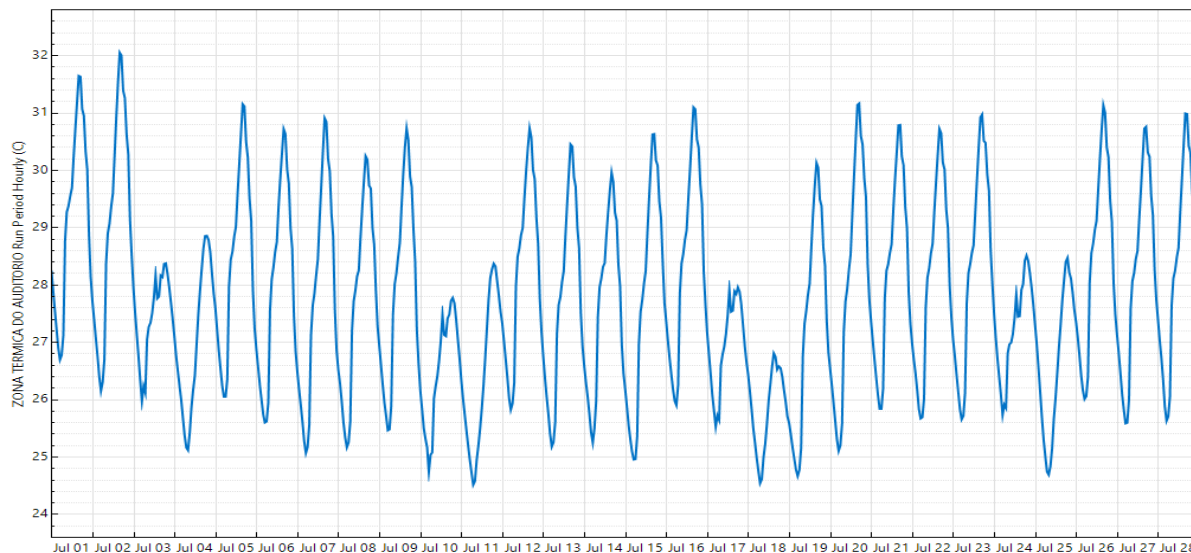


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.7 Zona térmica de julho

A zona térmica do auditório em julho, possui temperatura mínima de 24,5 °C e máxima de 32,04 °C, uma média de 27,77 °C com um desvio padrão de 1,71 °C.

Figura 33 - Zona térmica do auditório no mês de julho

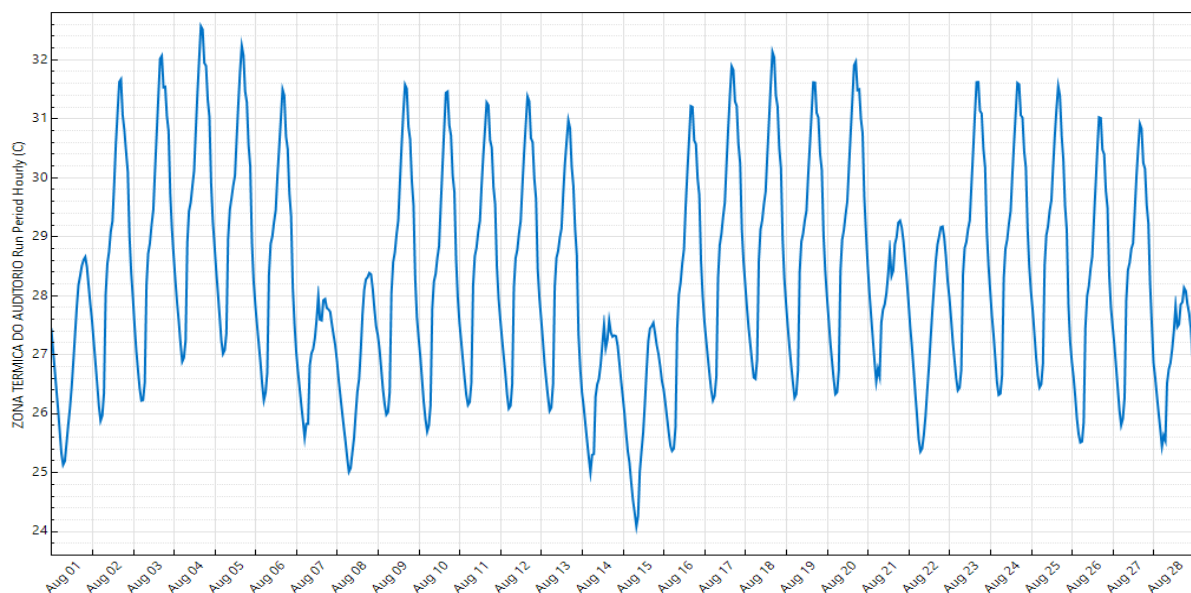


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.8 Zona térmica de agosto

A zona térmica do auditório em agosto, possui temperatura mínima de 24,07 °C e máxima de 32,56 °C, uma média de 28,26 °C com um desvio padrão de 1,85 °C.

Figura 34 - Zona térmica do auditório no mês de agosto

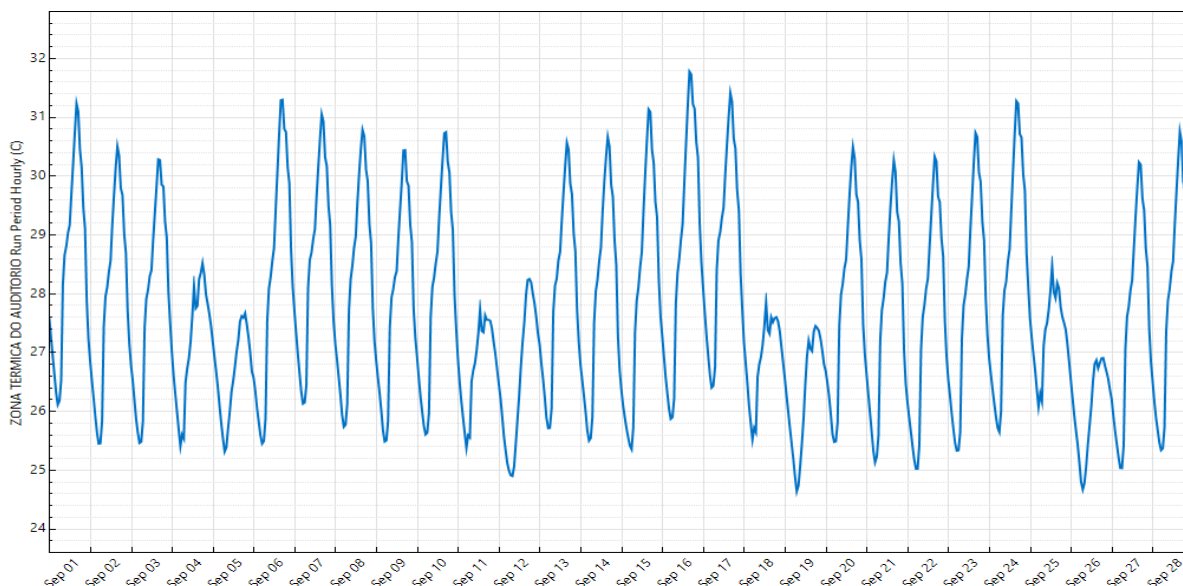


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.9 Zona térmica de setembro

A zona térmica do auditório em setembro, possui temperatura mínima de 24,6 °C e máxima de 31,77°C, uma média de 27,7°C com um desvio padrão de 1,68°C.

Figura 35 - Zona térmica do auditório no mês de setembro

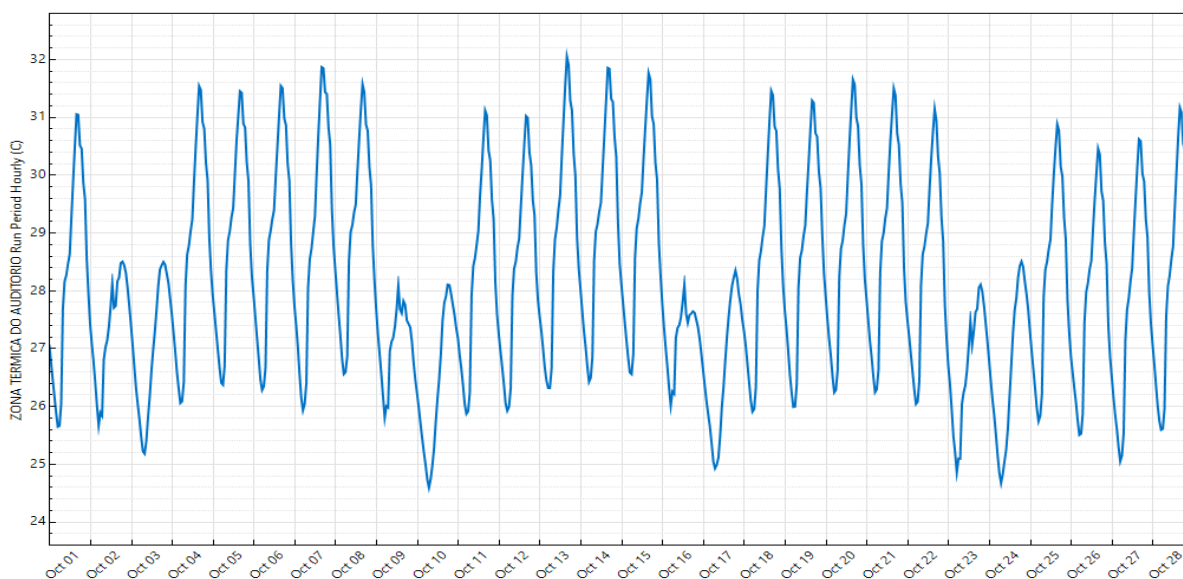


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.10 Zona térmica de outubro

A zona térmica do auditório em outubro, possui temperatura mínima de 24,58 °C e máxima de 32,04 °C, uma média de 28,09 °C com um desvio padrão de 1,76 °C.

Figura 36 - Zona térmica do auditório no mês de outubro

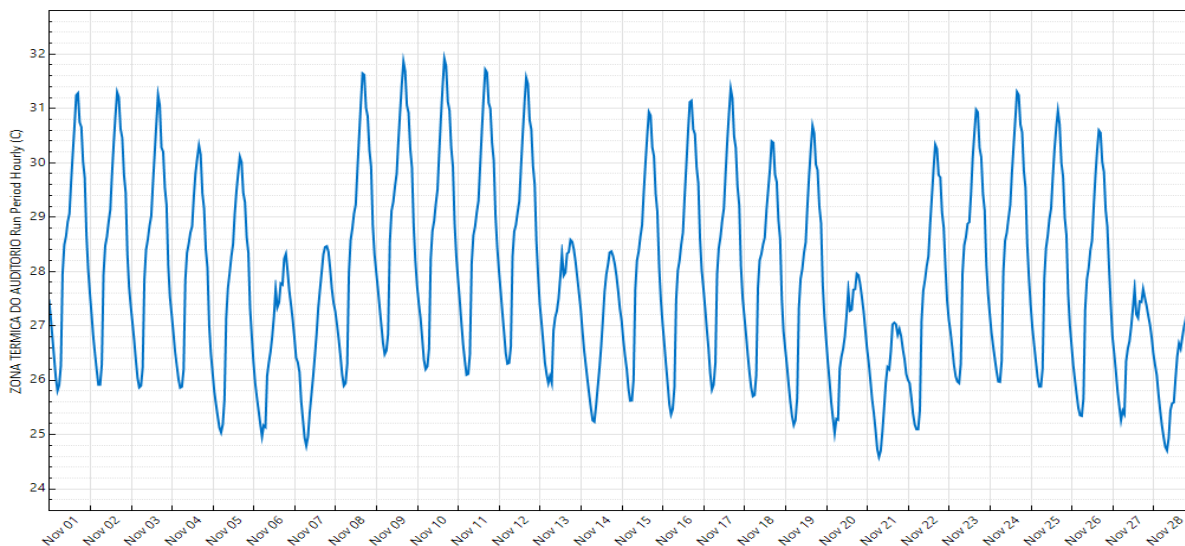


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.11 Zona térmica de novembro

A zona térmica do auditório em novembro, possui temperatura mínima de 24,58 °C e máxima de 31,9 °C, uma média de 27,85 °C com um desvio padrão de 1,76 °C.

Figura 37 - Zona térmica do auditório no mês de novembro

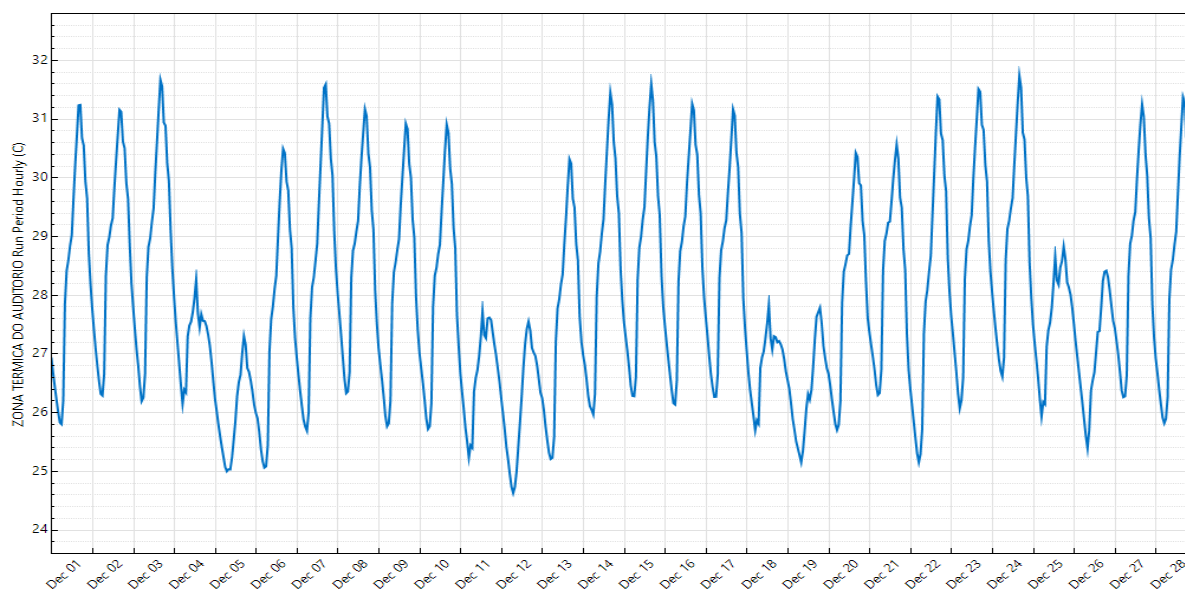


Fonte: Autoria própria, (2022)

### 5.12 Zona térmica de dezembro

A zona térmica do auditório em dezembro, possui temperatura mínima de 24,62 °C e máxima de 31,73 °C, uma média de 28,06 °C com um desvio padrão de 1,74 °C.

Figura 38 - Zona térmica do auditório no mês de dezembro



Fonte: Autoria própria, (2022)

Analisando as zonas térmicas dos meses acima, tem-se anualmente uma temperatura mínima de 23,78°C, máxima de 32,6°C, e uma média de 27,83°C com um desvio padrão de 1,75°C. Nas Figuras 28 até 39 da referida pesquisa não foram adotadas variáveis do tipo fisiológicas, eletrônicas e vestimentas, que podem aumentar ou diminuir a temperatura da zona térmica do ambiente. Analisou-se somente a temperatura estrutural do auditório, que apresentou junho como o mês de maior temperatura e fevereiro como o mês de menor temperatura no edifício, todos os meses ultrapassaram os parâmetros da ISO 9241/2011.

### 5.13 Análise anual com cargas internas (pessoas e suas vestes).

A taxa metabólica ( $M$ ) foi determinada em função das atividades físicas exercidas no auditório, utilizando como fonte ASHRAE (2001), escolheram-se os seguintes valores para o metabolismo:

- Sentado quieto,  $M = 60 \text{ W/m}^2$
- Movimentando sentado,  $M = 70 \text{ W/m}^2$

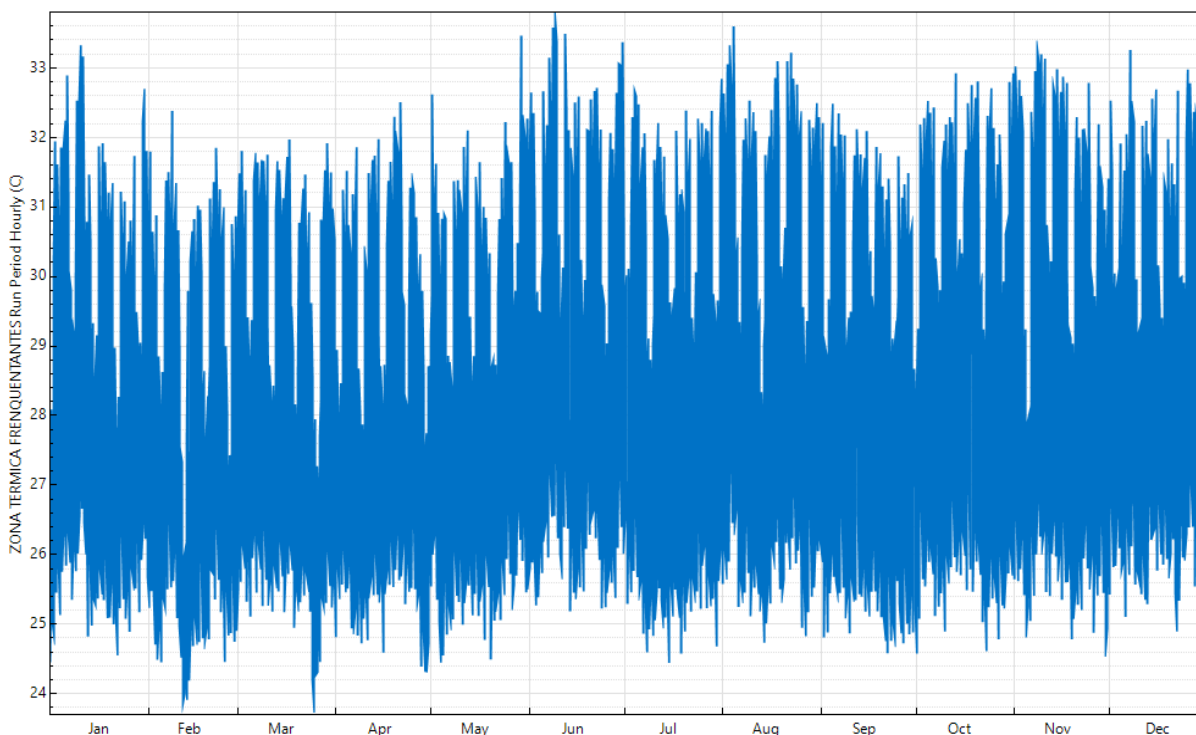
As vestes foram escolhidas conforme a Tabela 1 e seus dados térmicos retirados da bibliografia ASHRAE (2001), utilizando o padrão mais simples de veste visto em alunos do campus de Ananindeua, 50% para homens 50% para mulheres:

- Homens: camisa manga curta, calça grossa, cueca, meia barriga de perna e sapato.
- Mulheres: camisa manga curta, bermuda, calcinha, chinelo.

Embora essa análise seja mais proveitosa quando a análise de climatização do ambiente é feita logo em seguida, esta averiguação nos dá uma noção de aumento de temperatura com o número máximo de frequentantes (184 pessoas), com o método para climatização do *EnergyPlus* pode-se estipular por exemplo, a potência que determinada máquina de climatização necessita para chegar a uma temperatura desejada no ambiente, com os respectivos resultados térmicos já estipulados, devido a falta de informações de cargas internas (móveis, cotidiano do auditório, equipamentos) que influenciam a temperatura do ar no auditório, não foi realizado a análise de climatização do auditório com o *EnergyPlus*.

Logo, obteve-se uma temperatura mínima com pessoas de 23,89°C, máxima de 33,60°C, uma média de 28,25°C e um desvio padrão de 1,8°C, comparando com as temperaturas anuais estruturais do auditório (figura 39), tem-se um aumento de 0,42°C em sua média anual, como ilustra a Figura 40.

Figura 39 - Zona térmica com pessoas e vestes



Fonte: Autoria própria, (2022)

#### 5.14 Possíveis melhorias

Embora o padrão construtivo da planta baixa do auditório está de acordo com os materiais e medidas estabelecidas pela ABNT, esse desconforto térmico estrutural era de se esperar devido o próprio clima da região, como os materiais e medidas estão conforme os parâmetros estabelecidos pela ABNT sugestões de melhorias estruturais podem ser descartadas pela devida adequação dos materiais, melhorias como aumento nas dimensões de janelas, portas, paredes e telhados ou substituições de materiais que melhoram a circulação do ar, dissipação de energia, transmissividade térmica dos materiais, entre outros, não serão citadas. As melhores alternativas ainda são os sistemas de resfriamento (equipamentos). A radiação solar é um contribuinte em potencial para o aumento de temperatura em ambientes estruturais, uma alternativa viável e interessante é minimizar o contato direto da radiação solar com os materiais do edifício causando o superaquecimento dos mesmos, um item extremamente importante nesse quesito são as árvores. As mangueiras por exemplo são muito populares no estado do Pará, e suas copas grandes podendo cobrir com facilidade o auditório, uma pesquisa desenvolvida na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) da USP, mostrou a quantidade de árvores necessárias para diminuir a temperatura em determinado ambiente urbano. De acordo com o estudo, em Piracicaba, para diminuir a

temperatura em 1°C no meio urbano é necessário acrescentar 14,31% de cobertura arbórea na estação seca e 27,70% na estação chuvosa, isso ocorre devido a vegetação “impedir” a radiação solar, e conseqüentemente, o aquecimento do solo ou das construções, reduzindo a temperatura superficial.

Um exemplo interessante foi a criação de um prédio arborizado (“floresta vertical”) que foi inaugurado em outubro de 2014 em Milão, na área de *Porta Nuova*. O projeto do *Bosco Verticale* consiste de duas torres, uma de 80 e outra de 112 metros, que abrigam 480 árvores de porte médio e grande e outras 300 de pequeno porte, 11.000 plantas perenes e rasteiras e ainda 5.000 arbustos. O equivalente sobre uma superfície urbana de 1.500 m<sup>2</sup> e de 20.000 m<sup>2</sup> de floresta e vegetação rasteira. A floresta vertical é um conceito arquitetônico que substitui os materiais tradicionais nas superfícies urbanas utilizando uma policromia de folhas em suas paredes. O conceito se baseia numa camada de vegetação, necessária para criar o microclima adequado e filtragem da luz solar, e rejeita a abordagem tecnológica e mecânica pouco abrangente em relação à sustentabilidade ambiental.

Figura 40 - Edifício *Bosco verticale*.



Fonte: Paolo Rosselli, (2014)

Pode-se estipular um cálculo simplificado de carga térmica necessária para resfriar o auditório utilizando a norma NBR 16401-1/2008 para equipamentos de ar-condicionado, onde a unidade resultante é o BTU que irá propiciar uma noção da quantidade de potência e equipamentos necessários para resfriar o ambiente. O cálculo base funciona da seguinte forma: cada pessoa, m<sup>2</sup> de área, equipamentos, e janelas equivalem a 600 BTUs, a exposição a radiação solar equivale a 800 BTUs, todos os dados estão conforme a planta baixa e foi estipulado para o auditório 2 caixas de som, um datashow, 2 computadores e um bebedouro. Com isso tem-se a tabela abaixo para o auditório.

Tabela 6 - Cálculo base para Ar-condicionados.

<b>Variáveis</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Resultados em BTUs</b>
Pessoas	184	110.400
Área m <sup>2</sup>	226,22	135.732
Equipamentos	6	3.600
Balancins	8	4.800
Exposição a Radiação solar	1	800

Fonte: Autoria própria, (2022).

Com essa análise base o auditório precisará de aparelhos de ar-condicionado que cheguem no mínimo a 255.332 mil BTUs.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo dessa pesquisa foi alcançado, pois foi possível expressar através do uso dos *softwares* e dos gráficos obtidos a viabilidade de simular e gerar resultados sobre o desempenho térmico de uma edificação. 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, com estes dados averiguou-se se o edifício cumpria os padrões térmicos sobre conforto térmico estabelecidos pela ISO 9241/2011.

Os parâmetros utilizados na pesquisa para analisar as zonas térmicas geradas pelo programa foram cargas internas, materiais da sua própria estrutura como o tipo de material, sua espessura, condutividade térmica, e variáveis térmicas externas disponíveis no próprio arquivo climático do programa, radiação solar direta, bulbo seco, bulbo úmido, temperatura local, entre outros fatores. Com isso, averiguou-se que a zona térmica do auditório não atendeu aos padrões térmicos estabelecidos pela norma ISO 9241 nos meses estudados.

Nota-se que *softwares* de simulação computacional colaboram consideravelmente para o campo científico e profissional, pois é possível que qualquer edifício antes de ser construído possa ser examinado e testado sobre diversas variáveis térmicas, proporcionando análises práticas sobre desempenho energético.

### 6.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Utilizar a mesma base deste trabalho para realizar estudos térmicos estruturais em outros compartimentos do *campus* Universitário de Ananindeua/UFPA localizado no bairro do Icuí.
- Realizar com o *Energyplus* estudos de conforto térmico em salas de escolas públicas (ensino fundamental e médio) onde geralmente não dispõem de bons equipamentos de climatização, tomando como base parâmetros térmicos das ISOs ou outros tipos de normas.
- Utilizar diferentes tipos de materiais em uma mesma estrutura, ou seja, realizar várias simulações na estrutura com materiais alternativos (ecológicos, compósitos, etc.), e posteriormente comparar seus resultados para fins de bem-estar térmico.
- Realizar estudos sobre conforto térmico utilizando o *EnergyPlus* e comparar seus resultados com diferentes metodologias, por exemplo o Voto Médio Previsto (*PMV*) de Fanger (1970).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2 - **Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6401 - **Instalações centrais de ar-condicionado para conforto - Parâmetros básicos de projeto**. Rio de Janeiro, 1980.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-1 - **Instalações de ar-condicionado - sistema centrais e unitários**. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT. 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**, set de 2003.
- ALBUQUERQUE, C. **Arborização proporciona mais conforto térmico em zonas urbanas**. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-ambientais/arborizacao-proporciona-mais-conforto-termico-em-zonas-urbanas/>. Acesso em: 31 ago. 2021.
- ASHRAE, **Fundamentals Handbook**, 2001. Fundamentals. Atlanta.
- ASHRAE STANDARD 90.1-1989. **Energy Efficient Design of New Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. 1791 Tullie Circle, NE. Atlanta, Ashrae.
- BARBOSA, M.J., 1997. “**Uma Metodologia para Especificar e Avaliar o Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares**”, Tese de Doutorado, Florianópolis, UFSC, Centro Tecnológico.
- CRAWLEY, D.B., et al, 1999. “**EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program**”, Energy and Buildings, v-33/4, 443-457. Great Britain, Elsevier Science.
- CRAWLEY, D.B., et al, 2002. “**A new-generation building energy simulation program**”. Energy and Buildings. Great Britain, Elsevier Science.
- CORBELLA, Oscar; YANNAS, Simos. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Revan Ltda, 2003.

- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Engineering Reference**. Estados Unidos, 2022.
- DILKIN, P, 2000. “**Estudo de Desempenho Térmico de Edificações de Interesse Social a partir de Propostas de Normas**”, Dissertação de Mestrado, PPGEM – UFRGS, Porto Alegre, RS.
- CHUNG, T.M., TONG, W.C. “**Thermal comfort study of young Chinese people in Hong Kong. Building and Environment**”, Hong Kong, 1990.
- DE DEAR, R.J; LEOW, K.G.; AMEEN, A. “**Thermal comfort in the humid tropics- Part 1: Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore**”. In: ASHRAE Transactions, v. 97, I, 1991.
- ENERGYPLUS, Reference Data Set for Construction Material. Copyright (c) 2000-2001. GARD Analytics.
- ENERGYPLUS. Versão 9.3.0. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 31 ago. 2021.
- FANGER, P.O., 1970. “**Thermal Comfort**”, McGraw-Hill, New York.
- HAVENITH G., et al, 2002. “**Personal Factors in Thermal Comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production**”, Energy and Buildings, v-34, 581-591. Great Britain, Elsevier Science.
- HUMPHREYS, M.A., 1976. “**Field Studies of Thermal Comfort compared and Applied**”, **Building Service Engineer**, v-44, 5-27. Watford.
- IBGE INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. “**Pesquisa de informações básicas municipais**”: Perfil dos Municípios Brasileiros 2013. Belém do Pará: IBGE, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>. Acesso em: 31 ago. 2021.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort**, ISO 7730. Genebra, 1994.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Ergonomics of the thermal environment - Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales**, ISO 10551. Genebra, 1995.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9241.

**“Ergonomics – Determination of metabolic heat production”**, Genebra, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21929. **Sustainable in building construction – Sustainability indicators – par1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings**, 2011.

JONES, B.W., 2002. **“Capabilities and Limitations of Thermal Models for use in Thermal Comforts Standards”**, Energy and Buildings, v-34, 653-659. Great Britain, Elsevier Science.

MCNALL, P.E. ; JAAX, J. ; ROHLES, F.H. ; NEVINS, R. G. ; SPRINGER, W. **Thermal comfort (Thermally neutral) conditions for three levels of activity**. In: ASHRAE Transactions, v. 73, 1967.

NOBRE, J.C.A. ; SOUSA, D.L.P ; RIBEIRO, F.S. ; ANDRADE, L.C.F. **“Simulação Computacional Sobre Desempenho Térmico em uma Residência Conjunta Localizada em Ananindeua-PA”**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, Estado do Pará, v.8, n.5, (pg 1-14), Abril, 2022.

OLESEN, B.W., PARSONS, K.C., 2002. **“Introduction to Comfort Standards and to the proposed new version of EN ISO 7730”**, Energy and Buildings, v-34, 537-548. Great Britain, Elsevier Science.

OLGYAY, V. (1973). **“Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism”**. 4 a ed. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.

OPENSTUDIO. Versão 1.0.0. Disponível em: <https://www.openstudio.net/> Acesso em: 31 ago. 2021.

PEDERSEN, C.O., et al, 2001. **“EnergyPlus: New capabilities in a whole-building energy simulation program”**, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, RJ.

PEDROTTI, Gabriel. **Edifício Bosco Verticale**. 08 de Dezembro de 2015. Disponível em: <http://www.archdaily.com.br/br/778367/edificio-bosco-verticale-boeri-studio>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2022.

Projeto Arquitetônico – **Planta Baixa Biblioteca / Auditório** – Campus de Ananindeua (UFPA). Autor: Arquiteto Célio Otávio Pereira da Silva. CAU N° A 16660- 0 CAU/PARÁ, 2014.

RIBEIRO, B. A. **“Contribuição ao estudo térmico”**. Boletim nº86, Instituto de Higiene de São Paulo , São Paulo, 1945.

ROHLES, F. H. "**Temperature or Temperament: A Psychologist looks at Thermal Comfort**". ASHRAE Transactions. Atlanta: v. 86, n. 1, p. 541-554, 1980.

SÁ, P. "**Estudos para o estabelecimento de uma escala de temperaturas efetivas no Brasil**". Revista Brasileira de Engenharia. Rio de Janeiro, 1934.

SÁ, P. "**Estudos sobre conforto térmico no Brasil**": o termômetro resultante de **Missenard**. Instituto Nacional de Tecnologia. Rio de Janeiro, 1936.

SOUSA, D.L.P ; NOBRE, J.C.A. ; ANDRADE, L.C.F. "**Análise Térmica de Bases de Dados Climáticos da Cidade de Belém-PA**". The Journal of Engineering and Exact Sciences, Estado do Pará, v.8, n.3, (pg 1-12), Maio de 2022.

STRAND R., et al, 2002. "**Enhancing and Extending the capabilities of the building heat balance simulation technique for use in EnergyPlus**", Energy and Buildings, Great Britain, Elsevier Science.

SKETCHUP. Versão 19.0.685. Disponível em: <https://www.sketchup.com/pt-BR>. Acesso em: 31 ago. 2021.

TANABE, S., KIMURA, K. and HARA, T. (1987) "**Thermal Comfort Requirements during the Summer Season in Japan**". ASHRAE Transactions, 93, 564-577.

XAVIER, A.A.P, 1999. "**Condições de Conforto Térmico para estudantes de 2º grau na região de Florianópolis**", Dissertação de Mestrado, Florianópolis, UFSC, Centro Tecnológico.