



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

**DAVID LOHAN PEREIRA DE SOUSA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO UTILIZANDO O**  
**SOFTWARE ENERGYPLUS**

**ANANINDEUA-PA**

**2022**

DAVID LOHAN PEREIRA DE SOUSA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO UTILIZANDO O  
SOFTWARE ENERGYPLUS**

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade

**ANANINDEUA-PA**

**2022**

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

---

S725a Sousa, David Lohan Pereira de.  
ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO  
UTILIZANDO O SOFTWARE ENERGYPLUS / David Lohan  
Pereira de Sousa. — 2022.  
80 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. Simulação Computacional. 2. Desempenho  
Térmico. 3. Consumo Energético. 4. EnergyPlus. I.  
Título.

CDD 620

---

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO UTILIZANDO O  
SOFTWARE ENERGYPLUS**

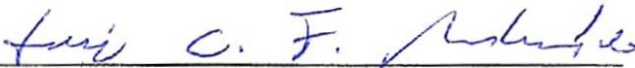
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao *campus* universitário de Ananindeua da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.


Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade

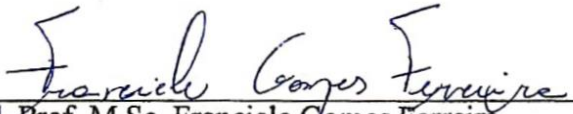
Aprovado em: 03/05/2022

Conceito: Excelente

Banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D.Sc. Luiz Cláudio Fialho Andrade  
Orientador - FACT/UFPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.Sc. Disterfano Lima Martins Barbosa  
Membro Interno - FACT/UFPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.Sc. Franciele Gomes Ferreira  
Membro Interno - FACT/UFPA

**ANANINDEUA-PA**

**2022**

Dedico este trabalho a minha mãe, meus amigos e todos os demais que me ajudaram ao longo desta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe, Maria de Nazaré, por todo apoio e por estar presente em todos os momentos da minha vida que me permitiram chegar até aqui.

A Universidade Federal do Pará pela oportunidade de acesso ao curso superior, por permitir a utilização dos serviços oferecidos e suporte que me permitiram fazer esse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Claudio Fialho Andrade, por estar disposto a me orientar, pelas correções e ideias para produções científicas futuras.

Ao Eng. Civil Oniwendel Felipe de Moraes Pereira juntamente ao CPGA (Divisão de Infraestrutura, Obras e Serviços), por disponibilizarem as plantas dos prédios que foram utilizados como material indispensável para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho consiste em investigar a metodologia de cálculo de carga térmica utilizada no *software EnergyPlus* e realizar simulações computacionais para análise do desempenho térmico em um edifício institucional da Universidade Federal do Pará, localizado no município de Ananindeua-PA, planejando demonstrar a capacidade do método abordado, utilizando o *software* em questão. Em relação a este edifício foram determinadas diversas características, entre elas, elementos construtivos e suas propriedades térmicas, perfil de atividades, consumo por unidade dos equipamentos elétricos e sistema de iluminação. Para analisar o conforto térmico e o consumo energético do edifício foram escolhidas as seguintes variáveis de saída: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, radiação solar direta, temperatura do ar da zona térmica, energia de iluminação e energia elétrica dos equipamentos. Esses dados foram simulados e analisados para o período letivo de acordo com o calendário acadêmico da instituição, representando todas as épocas do ano, com as temperaturas mais elevadas, e os períodos de frio ou chuvas. Para esta etapa necessitou-se a utilização do arquivo climático da cidade estudada. A ferramenta de simulação computacional utilizada para o cálculo do conforto térmico e consumo energético neste trabalho foi o programa *EnergyPlus v9.6.0*, o qual emprega o Método de Balanço de Calor (HBM) para cálculo de carga térmica. Os resultados obtidos para o conforto térmico foram que os ambientes simulados pelo programa apresentaram temperaturas entre 23,7°C e 33,3°C, com estes dados foi possível verificar a quantidade de horas e representatividade (%) anual em que os ambientes estão dentro dos padrões estabelecidos pela ISO 9241/2011 e da NR 17, o estudo se mostrou bastante coerente com as condições externas referentes a cidade de Belém-PA, indicando a boa capacidade do programa *EnergyPlus* nestes casos simulados. Para a análise de consumo energético, pôde obter-se dados estatísticos gerados a partir da simulação, apresentação do consumo em kWh mensal e anual de cada sistema e a representatividade (%) em relação ao consumo total do edifício, com isso nota-se que a proporção de consumo energético dos computadores representa a maior parte do consumo total, por conta de que, o consumo de um único computador equivale a mais da metade do consumo total do sistema de iluminação.

**Palavras-chave:** Simulação Computacional; Desempenho Térmico; Consumo Energético; *EnergyPlus*.

## ABSTRACT

This work consists of investigating the thermal load calculation methodology used in the EnergyPlus software and performing computer simulations to analyze the thermal performance in an institutional building of the Federal University of Pará, located in the municipality of Ananindeua-PA, planning to demonstrate the capability of the method addressed, using the software in question. In relation to this building, several characteristics were determined, among them, constructive elements and their thermal properties, activity profile, consumption per unit of electrical equipment and lighting system. To analyze the thermal comfort and energy consumption of the building, the following output variables were chosen: dry bulb temperature, wet bulb temperature, direct solar radiation, air temperature in the thermal zone, lighting energy and electrical energy of the equipment. These data were simulated and analyzed for the academic period according to the institution's academic calendar, representing all times of the year, with the highest temperatures, and periods of cold or rain. For this step, it was necessary to use the climate file of the city studied. The computer simulation tool used to calculate thermal comfort and energy consumption in this work was the program EnergyPlus v9.6.0, which uses the Heat Balance Method (HBM) to calculate the thermal load. The results obtained for thermal comfort were that the environments simulated by the program presented temperatures between 23.7°C and 33.3°C, with these data it was possible to verify the number of hours and annual representativeness (%) in which the environments are within the standards established by ISO 9241/2011 and NR 17, the study proved to be quite consistent with the external conditions referring to the city of Belém-PA, indicating the good capacity of the EnergyPlus program in these simulated cases. For the analysis of energy consumption, it was possible to obtain statistical data generated from the simulation, presentation of the consumption in monthly and annual kWh of each system and the representativeness (%) in relation to the total consumption of the building, with this it is noted that the proportion of energy consumption of computers represents most of the total consumption, because the consumption of a single computer is equivalent to more than half of the total consumption of the lighting system.

**Keywords:** Computer Simulation; Thermal Performance; Energy Consumption; EnergyPlus.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Edifício <i>Green Building</i> .....	18
Figura 02 – Ferramentas de Troca de Calor Dedicadas a Edificações .....	36
Figura 03 – Divisão de Áreas Bioclimáticas Brasileiras .....	37
Figura 04 – Esquemas de Controle Contínuo e Controle por Degrau .....	39
Figura 05 – Determinações dos Graus de Iluminância.....	40
Figura 06 – Diagrama Característico do Ciclo Simples de Refrigeração.....	41
Figura 07 – Divisão do Consumo por Uso Final .....	43
Figura 08 – Diagrama dos Softwares de Simulação Computacional .....	45
Figura 09 – Diagrama: Volume de Controle do Equilíbrio de Calor em Superfícies Externas .....	47
Figura 10 – Interface de Simulação – EnergyPlus 9.6.0 .....	47
Figura 11 – Diagrama de Gerenciamento por Módulos do EnergyPlus.....	48
Figura 12 – Edifício Modelado no Software SketchUp 2021 v21.0.391 .....	49
Figura 13 – Aba <i>Site</i> do <i>OpenStudio v3.3.0</i> .....	50
Figura 14 – Aba <i>constructions</i> do <i>OpenStudio v3.3.0</i> .....	51
Figura 15 – Aba <i>spaces typess</i> do <i>OpenStudio v3.3.0</i> .....	51
Figura 16 – Aba <i>facility</i> do <i>OpenStudio v3.3.0</i> .....	52
Figura 17 – Variáveis de Saída Para Análise dos Resultados da Simulação de Conforto Térmico.....	53
Figura 18 – Variáveis de Saída Para Análise dos Resultados da Simulação de Consumo Energético.....	53
Figura 19 – <i>Run Simulation</i> .....	54
Figura 20 – <i>Results Summary</i> .....	54
Figura 21 – Dados de Latitude, Longitude e Altura do Município de Ananindeua-Pa.....	55
Figura 22 – Localização .....	55
Figura 23 – (Planta Baixa) <i>Hall</i> de entrada, Circulação, Banheiro Masculino, Banheiro Masculino PNE, Banheiro Feminino, Banheiro Feminino PNE.....	57
Figura 24 – (Planta Baixa) Escada, Sala de Acervo Técnico, Plataforma Elevatória P/ PCD, Sala Bibliotecária, Biblioteca Acervo, Área de Leitura .....	57
Figura 25 – Temperaturas: Bulbo Úmido, Bulbo Seco e Radiação Solar Direta .....	61
Figura 26 – Comportamento da Temperatura ao Longo do Ano Letivo para as Zonas: Hall de Entrada e Circulação, Banheiro Feminino, Banheiro Feminino PNE, Banheiro Masculino,	

Banheiro Masculino PNE .....	62
Figura 27 – Comportamento da Temperatura ao Longo do Ano Letivo para as Zonas: Biblioteca Acervo e Área de Leitura.....	62
Figura 28 – Curva de Duração das Zonas: <i>Hall</i> de Entrada e Circulação, Banheiro Feminino, Banheiro Feminino PNE, Banheiro Masculino e Banheiro Masculino PNE .....	64
Figura 29 – Curva de Duração das Zonas: Biblioteca Acervo e Área de Leitura.....	65
Figura 30 – Gráfico do Consumo [kWh/mês] do Sistema de Iluminação e dos Equipamentos Elétricos da Zona Térmica .....	68
Figura 31 – Mapa de Consumo Energético.....	69
Figura 32 – Resumo dos Resultados da Simulação de Conforto Térmico .....	70
Figura 33 – Resumo dos Resultados da Simulação de Consumo Energético.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Informações de Cálculo.....	56
Tabela 02 – Dimensões Gerais dos Ambientes do Edifício Descritos na Planta do Projeto..	56
Tabela 03 – Elementos Construtivos Listados na Planta do Projeto .....	58
Tabela 04 – Propriedades Térmicas dos Materiais .....	59
Tabela 05 – Propriedades Térmicas dos Tipos de Vidro Utilizados.....	59
Tabela 06 – Dados Estatísticos: Média, Desvio Padrão, Temperaturas Máximas e Mínimas Diárias dos Ambientes.....	63
Tabela 07 – Dados Climatológicos Para Belém .....	66
Tabela 08 – Dados Estatísticos do Consumo do Sistema de Iluminação e Equipamentos Elétricos.....	68
Tabela 09 – Consumo de Energia Anual .....	69

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BLAST	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CLTD	Diferença de Temperatura Equivalente Entre o Ambiente Interno e Externo
CLF	Fator de Ponderação Para Conversão da Componente Radiante dos Ganhos de Calor
COP	Coefficiente de Performance
CTF	Funções de Transferência de Condução
CT	Carga Térmica
CTF	Funções de Transferência de Condução
DOE	<i>Department of Energy</i>
HBM	Método de Balanço de Calor
IDF	<i>Input data file</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
RTF	Fatores de Tempo Radiantes
RTSM	Método das Séries Temporais Radiantes
SHGC	<i>Solar Heat Gain Coefficient</i>
TRC	Transferência de Calor
VLT	<i>Visible Light Transmittance</i>
VME	Voto Médio Estimado
VRF	Fluxo Refrigerante Variável
VRV	<i>Variable Refrigerant Volume</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
2.1 CONCEITO DE <i>GREEN BUILDING</i> .....	18
2.2 CONFORTO TÉRMICO .....	19
2.2.1 Cenário Histórico Referente a Pesquisas de Conforto Térmico.....	19
2.2.2 Principais Normas Regulamentadoras .....	20
2.2.3 Norma Regulamentadora Brasileira .....	21
2.3 INFLUÊNCIA NOS RESULTADOS.....	21
2.4 COMPORTAMENTO TÉRMICO DA CONSTRUÇÃO .....	21
2.5 FATORES QUE INTERFEREM NO CONFORTO TÉRMICO .....	23
2.6 MÉTODOS DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA.....	23
2.6.1 Método do Balanço de Calor (HBM).....	23
2.6.2 Método das Séries Temporais Radiantes (RTSM).....	25
2.6.3 Métodos Simplificados.....	26
2.6.4 Métodos Detalhados.....	27
2.6.5 Métodos Intermediários .....	27
2.7 BASE PARA A ZONA E INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE AR .....	28
2.8 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES .....	30
2.8.1 Envoltória de Edificações .....	32
2.8.2 Propriedades Físicas dos Elementos Construtivos.....	32
2.8.3 Janelas com Controle de Fluxo de Ar .....	38
2.8.4 Controle de Potência e Iluminação.....	38
2.8.5 Consumo Energético de Edificações.....	39
2.9 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM EDIFICAÇÕES .....	44
2.9.1 <i>SketchUp</i> .....	45
2.9.2 <i>OpenStudio</i> .....	45
2.9.3 <i>EnergyPlus</i> .....	46

<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>49</b>
3.1 MÉTODOS UTILIZADOS .....	49
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	50
3.3 SIMULAÇÃO.....	50
3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO.....	54
3.4.1 Caracterização da Localização .....	54
3.4.2 Informações Para Cálculo do Edifício .....	56
3.4.3 Dimensões Gerais.....	56
3.4.4 Envoltória do Edifício .....	58
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
4.1 SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO.....	60
4.1.1 Resultados da Simulação de Conforto Térmico.....	60
4.1.2 Melhorias Viáveis Para Maior Alcance do Conforto Térmico.....	66
4.2 SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE CONSUMO ENERGÉTICO .....	67
4.2.1 Resultados da Simulação de Consumo Energético .....	68
4.3 RESUMO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....	69
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO

A preocupação com o conforto térmico vem avançando na humanidade há tempos e todas as construções dão importância a satisfação de quem irá desfrutar de tal obra, porém, estas condições são de certa forma, dependentes da relação do homem com o meio em que se vive, bem como a escolha dos materiais que compõem seus abrigos.

Independente da sensação térmica de um espaço, dentro das limitações físicas, este poderá ser termicamente agradável para uns e desconfortável para outros, i.e., um espaço termicamente agradável deve contemplar elementos que promovam, em média, uma sensação térmica que não deve ser nem de muito calor, e nem de muito frio, isso é algo particular, dentro dos limites físicos de cada um.

Ao entrar em qualquer ambiente de um edifício, todos procuram uma temperatura agradável, tanto em dias frios, quanto em dias quentes. O indivíduo que usufrui do ambiente carece de conforto térmico, pois a ausência dele dificulta o progresso das atividades que serão realizadas, seja trabalhar, estudar, descansar, etc.

De modo simplificado, pode-se dizer que o conforto térmico é alcançado a partir do momento em que o indivíduo não está sentindo nem frio e nem calor. A característica da roupa usada pela pessoa contribui para atingir esse conforto, e.g. em dias quentes pode-se colocar roupas leves, e em dias frios, roupas mais grossas e compridas.

A forma, o formato e os materiais usados para construção do edifício colaboram significativamente para o aumento do conforto térmico. Nos elementos construtivos de vedação pode ser citado o tipo de tijolo, espessura, tipo de revestimento, tamanhos e materiais utilizados em portas e janelas. Já na parte de cobertura pode ser citado o tipo de telha, o material usado na sustentação do telhado, se o edifício possui (ou não) laje e forro, e os materiais utilizados na confecção dos mesmos.

Desse modo a análise do desempenho térmico se faz fundamental para ajudar em uma melhor escolha dos elementos construtivos do edifício. Independente do padrão construtivo ser de baixo, médio ou alto custo, que o edifício seja construído de forma que a temperatura em seus ambientes seja agradável, conseguindo assim atender as condições das atividades que ali serão realizadas e do local da construção.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em essência: promover o conforto térmico de edificações, eficiência energética e redução de custos.

Considerando as características de abordagem da eficiência térmica e energética vinculada ao consumo de energia nas edificações e, com a finalidade de projetar o sistema de climatização baseado no projeto arquitetônico do edifício, ferramentas, e.g., *softwares* de simulação termoenergética, estão presentes no mundo todo com o objetivo de analisar o nível de desempenho térmico e energético em edificações.

Fundamentado nesses conceitos, este trabalho tem como objetivo principal estudar a aplicação do *software EnergyPlus*, um *software* livre, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2, distribuído pelo departamento de energia dos EUA, que simula a carga térmica e a eficiência energética de edificações e seus sistemas, e como estes podem ajudar na seleção dos materiais aplicados na construção do edifício e a orientação geográfica da edificação.

Os programas de simulação computacional são métodos usados na análise de desempenho energético, em que várias propostas como sistemas de iluminação, materiais, condicionamento do ar e desenho de estruturas podem ser analisados e testados (MENDES *et al*, 2005).

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Investigar a metodologia de cálculo de carga térmica utilizada no *software EnergyPlus* e realizar simulações computacionais para análise do desempenho térmico em um edifício institucional da Universidade Federal do Pará, planejando demonstrar a capacidade do método do método abordado, utilizando o *software* em questão.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Fazer uma avaliação do comportamento térmico e energético do edifício institucional;
- Determinar as cargas térmicas do edifício.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos.

O capítulo um apresenta uma introdução ao tema abordado, a justificativa do trabalho e os seus objetivos.

O capítulo dois aborda fundamentos e conceitos relacionados a métodos de cálculo de cargas térmicas, conforto térmico e eficiência energética, e descreve aspectos essenciais dos métodos computacionais utilizados, como também uma descrição essencial para compreensão dos métodos computacionais empregadas no mesmo.

O capítulo três aborda a metodologia utilizada no trabalho, juntamente com as características construtivas do edifício, materiais e equipamentos, e informações necessárias para proceder à análise do edifício.

O capítulo quatro mostra os resultados obtidos das simulações em relação ao conforto térmico e expõe uma breve análise de consumo energético.

O capítulo cinco expõe as considerações mais importantes obtidas deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONCEITO DE *GREEN BUILDING*



**Figura 01 – Edifício *Green Building*.**

**Fonte: Ugreen - Green Buildings e sua Relação com a Sustentabilidade (2022).**

Um edifício *Green Building* é aquele que a vida útil de operação e a construção certificam o espaço possivelmente mais saudável, usando controladamente materiais e insumos como energia, água, terra entre outros. Um sistema *Green Building* exemplar é aquele que realmente simula completamente as circunstâncias da área da construção. Consequentemente o projeto se encontrará capacitado para ser colocado em prática, (EPA, 2012).

De acordo com Martinez *et al* (2009), a vida útil de um edifício em geral é muito extensa. Sendo assim, todas as decisões tomadas no início do projeto terão consequências futuras, para os usuários do edifício e para a vizinhança. Assim, a performance preliminar do projetista, além da sua competência de aperfeiçoar o projeto no decorrer do tempo, é de uma importância significativa. Inclusive segundo Martinez *et al* (2009), um grande investimento financeiro é representado pelas edificações, e é considerável que sejam analisadas as questões ecológicas dos materiais utilizados nas construções. As análises dos edifícios geralmente são feitas de forma restringida, pois meramente são considerados fatores como qualidade, estética, utilização e localização.

O conceito de *Green Building* no projeto gera vantagens ambientais como preservação da biodiversidade com a diminuição do uso e defesa dos bens naturais, vantagens econômicas, como amplificação de mercados e aperfeiçoamento na produção e melhoramento social, como progresso no conforto, qualidade de vida e saúde das pessoas, (EPA, 2012).

## 2.4 CONFORTO TÉRMICO

Avaliado como uma circunstância da mente, que indica o bem-estar com a temperatura da zona térmica onde a pessoa se encontra. Uma pessoa em conforto térmico não deve se sentir com calor ou frio para que a condição seja obtida. A troca de calor do indivíduo com o ambiente acontece por meio dos modos de condução, convecção, radiação, e transferência de massa. (FANGER, 1970). O conforto térmico é estabelecido pelo efeito causado por alguns fatores: umidade do ar, velocidade do ar, movimentação pessoal, radiação térmica, condição de vestimenta e temperatura (HALAWA, VAN HOOFF E SOEBARTO, 2014).

De acordo com Santos & Andrade (2008), o bem-estar térmico é um atributo que claramente afeta a performance das atividades realizadas e provoca uma influência significativa acerca da saúde humana.

O conforto térmico tem uma importância considerável no dia-a-dia, já que interfere no desempenho e produtividade pessoal, além de provocar ou intensificar doenças, assim, o bem-estar térmico é fundamental em qualquer ambiente habitado pelo homem.

De maneira oposta ao que muitos pensam, o conforto térmico não precisa somente da temperatura do ar no local, vai mais adiante disso. É adaptado em conformidade com a condição fisiológica: existe uma condição diferente na climatização quando relacionado a uma pessoa executando atividades físicas e outra na estagnação, idades diferentes, sexo, etc.

De acordo com Nobre, Sousa & Andrade (2022), com objetivo de reduzir custos de energia, é importante ter um bom projeto de climatização, a partir de materiais, arquitetura e um projeto de viabilização do conforto térmico ideal, utilizando o método de simulação computacional utilizando o *software EnergyPlus*, que possibilita condições adequadas ao conforto humano, permitindo que os usuários possam realizar suas atividades dentro do local construído, independentemente da situação climática externa. Neste âmbito, a análise de conforto térmico de edificações obtém uma importância essencial quanto às demandas futuras de energia e suas condições de conforto, para assim, atender as necessidades de quem ali mora ao longo do ciclo de vida da edificação.

### 2.4.2 Cenário Histórico Referente a Pesquisas de Conforto Térmico

As pesquisas iniciais referentes às taxas de conforto térmico ocorreram na América do Norte, exclusivamente nos EUA, entre 1913 e 1923. Desde então essa temática vem sendo estudada em várias partes do mundo e diversas metodologias vêm sendo elaboradas para

observação do conforto térmico. O método mais famoso e fortemente aceito é o Voto Médio Estimado (VME) ou naturalmente nomeado de *Predicted Mean Vote* (PMV), que foi demonstrado pelo instrutor dinamarquês Ole Fanger e reproduzido em FANGER (1970). Em seu estudo ele aplicou dados processados em experiências laboratoriais, com um quantitativo acima dos 1300 humanos, desenvolvendo a equação que permite, a partir do levantamento dos elementos ambientais e humanos, analisar o fenômeno da sensação térmica em um grupo de pessoas (VME) quando detectado em uma combinação determinada dessas diversidades.

Os estudos em laboratório de Rohles *et al.*, 1966; Mcnall *et al.*, 1967 e Fanger. 1970 que incorporam a ISO 7730 foram desenvolvidas em países de climas diferentes, tendo como exemplo os trabalhos de De Dear, Leow & Ameen, 1991; Tanabe, Kimura & Hara, 1987; Chung & Tong, 1990, os resultados adquiridos não apresentaram alterações relevantes, por volta de  $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ , no que se refere às bases térmicas neutras.

### 2.2.2 Principais Normas Regulamentadoras

As mais importantes normas internacionais foram elaboradas pela ISO (*International Organization for Standardization*) e também pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*), com objetivo de determinar medidas padrões para análise do desempenho energético e conforto térmico, onde seus fundamentos originam-se de experimentos em câmaras climatizadas, especialmente aqueles praticados por Fanger (1970). As normas:

- ISO 7730/2005. Norma para aplicação de ambientes térmicos suaves, define o índice PMV (Voto médio) e PPD (pessoas insatisfeitas) e critérios das condições para conforto;
- ISO 10551/1995. Diz respeito à ergonomia de ambientes térmicos analisando a intervenção do ambiente térmico usando escalas características de julgamento;
- ISO 9241/2011. Norma que indica que a temperatura ideal no verão está entre 20°C e 24°C e no inverno entre 23°C e 26°C, com umidade relativa do ar entre 40% e 80%;
- ASHRAE Standard 55/2017. Norma que determina requisitos para ocupação humana, que inclui informações referentes ao isolamento das vestimentas, localizações e medições dos períodos, em companhia de uma bibliografia baseada nos princípios de Fanger (1970).

### 2.2.3 Norma Regulamentadora Brasileira

Segundo o ministério do trabalho a NR 17, declara que as temperaturas do ambiente de trabalho devem ficar entre 20°C e 23°C, com a umidade do ar abaixo dos 40%. A umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água que existe no ar (umidade absoluta) e quantidade máxima de água que poderia existir na mesma temperatura (ponto de saturação). Um exemplo de comparação é a norma internacional ISO 9241, que determina a temperatura ideal entre 20° e 24° no verão e 23°C e 26°C no inverno, com umidade relativa entre 40% e 80%.

## 2.3 INFLUÊNCIA NOS RESULTADOS

Um ambiente com a temperatura desbalanceada é acompanhado de um desconforto, aumentando o cansaço e a irritabilidade. Em determinadas situações, um efeito pode ser movimentos involuntários como tremores, se a temperatura estiver muito baixa, atrapalhando mobilidades nas mãos ou ocasionar dores e carência de disposição, se a temperatura estiver elevada pode causar fraqueza, ansiedade, irritabilidade e dificuldade em manter atenção. O bem-estar térmico nos ambientes é um assunto de muita importância, pois afeta tanto a produtividade quanto a saúde dos indivíduos.

## 2.4 COMPORTAMENTO TÉRMICO DA CONSTRUÇÃO

Arantes (2012) diz que o conforto na arquitetura é como a harmonia de elementos dimensionais (ambientes para as ocupações), operacionais (permanência, convívio), psicológicos (constatação, adequação) e fisiológicos (perspectivas, higiênicos e térmicos).

Elementos como paredes, coberturas, portas e janelas, são itens que colaboram para o crescimento ou diminuição do conforto térmico dentro de um ambiente. Quanto menor for a condutividade térmica e maior a capacidade térmica do elemento usado, menor vai ser a troca de calor (PIMENTA *et al*, 2015).

É essencial a previsão da carga térmica a ser estabelecida em um ambiente, sempre em função das condições funcionais e humanas, para todos os tipos de clima distintos (FROTA e SCHIFFER, 2007).

As fontes que geram cargas térmicas no interior de qualquer ambiente podem ser apontadas como:

- Radiação solar;
- Presença e quantidade de indivíduos;
- Sistema de iluminação artificial;
- Processos produtivos;
- Máquinas, equipamentos e dispositivos.

De outra forma, as condições que atuam dissipando a carga térmica gerada no interior de ambientes são:

- A Ventilação Natural e Forçada

Transferência do ar na parte interna do edifício por meio de aberturas, umas operando como entradas e saídas, ocasionado pela diferença de pressão do ar através dos ambientes internos e externos. A renovação do ar nos ambientes viabiliza vantagens como a desconcentração de poeiras, poluentes e a dispersão do calor, atuando como um dos mecanismos de controle térmico do ambiente (FROTA e SCHIFFER, 2007).

- Condições Climáticas

É ideal que se faça uma pesquisa prévia das precipitações pluviais na região onde será feita a construção, pois os trabalhos podem ser afetados pelas condições climáticas, em especial as precipitações pluviométricas e a umidade dos solos superficiais, já que esses fatores podem se tornar negativos em termos de produção e prazos.

Estas afirmações podem ser observadas através de pesquisas desenvolvidas por Clapp (1966), onde ele analisa cinco obras semelhantes em diferentes épocas do ano, para examinar os efeitos das condições climáticas na produtividade, para diversos serviços e etapas de obra.

- Climatização

É perceptível a importância dos sistemas de climatização de ar e da envoltória com intuito de reduzir o consumo de energia em edificações. A envoltória é formada por todas as superfícies que servem como uma fronteira entre os ambientes interno e externo, tais como paredes, coberturas e fenestraçãoes (BRADSHAW, 2006).

## 2.5 FATORES QUE INTERFEREM NO CONFORTO TÉRMICO

Além das condições subjetivas de cada indivíduo, existem também condições objetivas, sendo viável, com base nisso, efetuar cálculos para estabelecer de forma efetiva a taxa de calor a ser removida do ambiente climatizado para que a troca de calor do corpo com o ambiente seja aproximadamente nula. Alguns deles são:

- Latitude: quanto mais perto da linha do equador, maiores serão as temperaturas;
- Orientação geográfica: paredes voltadas para o Oeste são as que mais ganham calor por efeito de radiação solar;
- Equipamentos: dissipação de energia em calor;
- Quantidade de paredes: paredes que separam o lado interno e externo da construção.

## 2.6 MÉTODOS DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

A ASHRAE (2013) aponta o Método de Balanço de Calor (HBM) e o Método das Séries Temporais Radiantes (RTSM) como os métodos mais avançados e comprovados para o cálculo de carga térmica de edifícios. O princípio básico desses métodos constitui-se em um balanço de energia para qualquer superfície do ambiente e um balanço de energia para o ar do interior, que estabelece os ganhos de calor que de fato se tornaram a carga térmica. O método mais detalhado é o HBM, já que ele trata as características do edifício de forma mais criteriosa, enquanto o RTSM trabalha de uma forma mais simplificada do HBM (LOPES, 2013).

### 2.6.1 Método do Balanço de Calor (HBM)

As equações de balanço de energia são ligadas com equações de transferência de calor por condução transiente por meio das paredes e coberturas, e da mesma forma com dados das condições climáticas, como: temperatura externa do ar de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, radiação solar direta e assim por diante (MCQUISTON; PARKER; SPITLER, 2005).

O balanço de calor na área externa de cada superfície pode ser modelado de acordo com a Equação 1. O elemento de radiação solar de comprimento de onda curta, direta e difusa, é levado pelo sentido geográfico do edifício, as propriedades dos materiais e as condições climáticas.

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

Onde:

$q''_{\alpha sol}$ : fluxo de radiação solar direta e difusa assimilada [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{LWR}$ : fluxo de calor por radiação de onda longa entre o ar e os arredores [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{conv}$ : fluxo de troca de calor por convecção com o ar externo [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{ko}$ : fluxo de calor por condução (parede) [W/m<sup>2</sup>].

De acordo com Pedersen, Fisher e Liesen (1997), o balanço de calor envolvendo as áreas internas das zonas térmicas é a parte primordial do HBM. O balanço de calor interno para cada face pode ser escrito da seguinte forma:

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

Onde:

$q''_{LWX}$ : fluxo líquido de radiação através das superfícies internas [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{SW}$ : fluxo líquido de radiação das lâmpadas para superfícies [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{LWS}$ : fluxo radiante dos equipamentos [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{ki}$ : fluxo de condução mediante a parede [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{sol}$ : fluxo de radiação solar absorvida e transmitida [W/m<sup>2</sup>];

$q''_{conv}$ : fluxo de calor convectivo para o ar interno [W/m<sup>2</sup>].

O processo de condução da parede é formado usando as funções de transferência de condução (CTF), que relacionam os fluxos de calor condutivo às temperaturas da superfície atual, passada e também, aos fluxos de calor passados (PEDERSEN; FISHER; LIESEN, 1997). A fórmula trivial para o cálculo de condução utilizando CTF é a seguinte:

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

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

Onde:

$X_j$ : coeficiente externo CTF,  $j = 0, 1, \dots, nz$ ;  
 $Y_i$ : coeficiente de transição CTF,  $j = 0, 1, \dots, nz$ ;  
 $Z_j$ : coeficiente interno CTF,  $j = 0, 1, \dots, nz$ ;  
 $\Phi_j$ : coeficiente de fluxo CTF,  $j = 1, 2, \dots, nq$ ;  
 $T_i$ : temperatura da superfície interna;  
 $T_o$ : temperatura da superfície externa;  
 $q''_{ko}$ : fluxo de condução na superfície externa;  
 $q''_{ki}$ : fluxo de condução na superfície interna.

Os dois limites de soma,  $nz$  e  $nq$ , consistem na construção da parede e também da técnica usada para calcular os CTF's. Os valores de  $nz$  e  $nq$  são de modo geral determinados com objetivo de minimizar o cálculo computacional.

#### 2.6.2 Método das Séries Temporais Radiantes (RTSM)

É baseado em inúmeros fatores de resposta de 24 termos para calcular o ganho de calor condutivo por meio de estruturas opacas e, também, conta com uma série temporal radiante de 24 termos para modificar o ganho radiante instantâneo em carga térmica (SPITLER; FISHER; PEDERSEN, 1997).

Seja qual for a hora do dia o calor condutivo obtido para cada superfície é dado pela soma dos fatores de resposta multiplicados pela diferença de temperatura na superfície, como mostra a Equação 5 abaixo:

$$q_{\theta} = A \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} (t_{e,\theta-j\delta} - t_{rc}) \quad (5)$$

Onde:

$q_{\theta}$ : transferência de calor condutiva horário para a superfície [W];

$A$ : área [m<sup>2</sup>];

$Y_{pj}$ : fator de resposta para a superfície relativo à hora  $j$ ;

$t_{e,\theta-j\delta}$ : temperatura SOL-AR [°C];

$t_{rc}$ : temperatura do ar da zona, que se assume como constante [°C].

Para a estabelecer os ganhos radiativos na carga térmica, usa-se as séries de tempo radiante, de modo a tratar esses ganhos através de fatores ponderantes (MCQUISTON; PARKER; SPITLER, 2005). A série resultante representa a porção de energia radiativa convertida em carga térmica a ser transmitida ao espaço por convecção em cada hora:

$$Q_{\theta} = r_0 q_{\theta} + r_1 q_{\theta-\delta} + r_2 q_{\theta-2\delta} + r_3 q_{\theta-3\delta} + \dots + r_{23} q_{\theta-23\delta} \quad (6)$$

Onde:

$Q_{\theta}$ : carga térmica para a hora atual [W];

$q_{\theta}$ : taxa de ganho de calor por radiação na hora atual [W];

$q_{\theta-\delta}$ : taxa de ganho de calor por radiação  $n$  horas antes [W];

$r_0, r_1, \dots, r_{23}$ : fatores de tempo radiante (RTF's).

Os RTF's são únicos para cada tipo de zona, já que dependem de vários fatores como a geometria da zona, das edificações presentes, massa térmica, objetos, ocupação, além da distribuição da radiação solar dentro da zona térmica.

### 2.6.3 Métodos Simplificados

Este método ainda é usado no Brasil por conta da sua simplicidade. Suas características são: não separação das componentes radiante e convectiva dos ganhos de calor, cálculos em regime permanente e determinação apenas do valor máximo diário da carga térmica, considerando apenas as condições mais rigorosas de exposição.

Desse modo, a determinação da carga térmica (CT) devido à transferência de calor por elementos opacos, reduz-se à seguinte equação.

$$CT = UA(T_{Ar-Sol} - T_{int}) \quad (7)$$

Onde:

$U$  = coeficiente global de troca de calor entre o ambiente interno e externo;

$A$  = área do elemento de vedação;

$T_{int}$  = temperatura de bulbo seco de projeto do ar interior;

$T_{Ar-Sol}$  = temperatura fictícia Ar-Sol, que é determinada por:

$$T_{Ar-Sol} = T_{ext} + \frac{\alpha \cdot I}{h_e} \quad (8)$$

Onde:

$T_{ext}$  = temperatura de bulbo seco de projeto do ar exterior;

$\alpha$  = absorptância à radiação solar da superfície externa do elemento de vedação;

$I$  = radiação solar incidente no elemento;

$h_e$  = coeficiente de troca de calor combinado convecção + radiação, na superfície externa do elemento de vedação.

#### 2.6.4 Métodos Detalhados

A definição da carga térmica sensível é feita aplicando-se à 1ª Lei da Termodinâmica a um volume de controle que contém todo o ar do recinto a ser condicionado. As hipóteses assumidas são: o ar é um fluido isotérmico, incompressível e com propriedades constantes, sua capacidade térmica é desprezível. Assim, a determinação da carga térmica é feita por meio da Equação 9.

$$Q_{cond\ j,t} + h_{j,t} (TS_{j,t} - T_{int,t}) + \sum_{k=1}^n FF_{j,k} h_r (TS_{k,t} - TS_{j,t}) + Rad_{j,t} = 0 \quad (9)$$

Sendo:

$Q_{cond\ j,t}$  = fluxo de calor por condução que atravessa a superfície de controle;

$K$  = índice que denota os demais elementos de vedação do ambiente;

$FF$  = fator de forma geométrico entre as superfícies  $j$  e  $k$ ;

$h_r$  = coeficiente linearizado de troca de calor por radiação;

$Rad$  = fluxo de calor radiante devido a fontes internas e à radiação solar que atravessa os elementos transparentes do edifício.

#### 2.6.5 Métodos Intermediários

Com esse método, a carga térmica é definida por meio de equações mais simples que as dos métodos detalhados que, contudo, usam fatores que tentam reproduzir o efeito do armazenamento térmico das componentes radiantes dos ganhos de calor e da natureza

transitória da condução de calor nos elementos de vedação. Entre tantos métodos destaca-se o das *CLTD/CLF* de uso contínuo nos EUA, seguindo sugestões da ASHRAE (1993), esse método passa a ganhar força no Brasil, cuja equação fundamental é exibida abaixo.

$$CT_t = \dot{m}_{inf} C_p (T_{int,t} - T_{ext,t}) + \sum_{j=1}^n U_j CLTD_{j,t} + Rad_t CLF_t \quad (10)$$

Onde:

*CLTD* = diferença de temperatura equivalente entre o ambiente interno e externo, na qual está embutido o efeito transitório de condução de calor e sua conversão em carga térmica;

*CLF* = fator de ponderação para conversão da componente radiante dos ganhos de calor em carga térmica, específico para cada fonte de energia radiante.

## 2.7 BASE PARA A ZONA E INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE AR

A base para a integração da zona e do sistema de ar é formular balanços de energia e umidade 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.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (11)$$

Onde:

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  = 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 da zona;

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

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

$\dot{Q}_{sys}$  = saída de sistemas de ar;

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

$$C_z = \rho_{air} C_p C_i;$$

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

$C_p$  = calor específico do ar da zona;

$C_i$  = multiplicador de capacidade de calor sensível (a descrição detalhada é fornecida a partir da Equação 12).

Se a capacitância do ar for desprezada, a saída do sistema em regime permanente deve ser:

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{al}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad (11)$$

Os sistemas de ar fornecem ar quente ou frio às zonas com objetivo de atender às cargas de aquecimento ou resfriamento. O sistema de energia fornecida à zona,  $Q_{sys}$ , pode ser formulada a partir da diferença entre o fornecimento de entalpia do ar e a entalpia do ar deixando a zona como mostra a Equação 12.

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (12)$$

Esta equação mostra que a vazão mássica de ar de suprimento da zona é exatamente igual à soma das taxas de fluxo de ar que saem da zona por meio do ar de retorno do sistema e são expelidos diretamente da zona. Ambas as correntes de ar saem da zona na temperatura média do ar da zona. O resultado de substituir a Equação 12 por  $Q_{sys}$  no balanço de calor, a Equação 11 é mostrada na Equação 13, a seguir.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (13)$$

A soma das cargas da zona e da saída do sistema de ar agora é igual à mudança na energia armazenada na zona. Tipicamente, a capacitância  $C_z$  seria aquela do ar da zona somente. No entanto, as massas térmicas consideradas em equilíbrio com a zona de ar poderiam ser incluídas neste termo.

O *software EnergyPlus* fornece três algoritmos de solução diferentes para resolver a energia e a umidade do ar da zona, equações de equilíbrio. Estes são definidos no campo

*Algorithm* no *ZoneAirHeatBalanceAlgorithm*, objeto: *3rdOrderBackwardDifference*, *EulerMethod* e *AnalyticalSolution*. Os dois primeiros métodos são para resolver a Equação 13, usa-se a aproximação de diferenças finitas, enquanto a terceira usa uma aproximação analítica para solução.

Para calcular o termo derivado em relação ao tempo, uma aproximação de diferença finita pode ser utilizada:

$$\frac{dT}{dt} = (\delta t)^{-1}(T_{z^t} - T_{z^{t-\delta t}}) + O(\delta t) \quad (14)$$

O uso de integração numérica em uma simulação de longo tempo é motivo de alguma preocupação devido ao potencial acúmulo de erro de truncamento ao longo de muitas etapas de tempo. Neste caso, a diferença finita de aproximação é de baixa ordem que agrava ainda mais o problema. No entanto, a natureza cíclica das simulações de energia do edifício deve fazer com que os erros de truncamento sejam cancelados em cada ciclo diário para que nenhum acúmulo líquido de erro ocorra, mesmo ao longo de muitos dias de simulação.

## 2.8 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

A eficiência energética é uma série de políticas e hábitos que diminuem despesas ou que elevam as quantidades de energia disponibilizadas sem mudança da geração (Martins, 1999). Desta forma, é válido julgar que as formas de energia renováveis são eficientes, visto que é evidente que não derivam de combustíveis fósseis ou formam resíduos prejudiciais ao ambiente.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), construções, processos de transporte e industriais eficientes energeticamente seriam capazes de diminuir as necessidades mundiais de energia por um terço em 2050.

Torna-se fundamental a utilização de medidas que possibilitem racionalização de energia, suprimindo desperdícios. Tornou-se prioridade a abordagem de racionalização energética em edificações, impondo uma correção dos modelos praticados, principalmente nos grandes centros urbanos, em que o acúmulo de edifícios necessita de uma quantidade energética excessiva.

Nessa circunstância, nota-se que sistemas de refrigeração de ambientes são dos maiores causadores do alto consumo de energia elétrica. Com objetivo de transformar esses sistemas

mais eficazes, o planejamento da construção precisa considerar inicialmente, a maneira que ocorre o aquecimento e resfriamento das áreas reservadamente, possibilitando o conforto térmico.

A concepção de eficiência energética é estabelecida pela modificação de energia básica em energia proveitosa (Sola & Kovaleski, 2004). Dessa forma, uma construção torna-se energeticamente mais eficiente que as demais no momento em que favorece as mesmas circunstâncias ecossistêmicas com um consumo energético inferior (Mazzaferro *et al*, 2015). Além disso, Fernandes (2001) diz que é possível avaliar a eficiência de edificações pelo seu desempenho em disponibilizar conforto térmico e iluminação apropriados aos seus utilizadores.

A observação de eficiência energética e térmica de uma construção é executada avaliando vários fatores, que variam e se relacionam desde as circunstâncias do clima da região, das informações construtivas, de instalações e propostas de manutenção (VELOSO & ELALI, 2004).

A forma mais eficaz, limpa e econômica de diminuir o consumo de energia é com a eficiência energética. Na maioria das instalações hoje em dia, ações mais ousadas de eficiência energética já são praticadas, onde existe a possibilidade de gerar bons níveis de diminuição de energia usando medidas tecnológicas acessíveis atualmente no mercado.

Rupp (2011) analisando a eficiência de edifícios comerciais, criou um mecanismo para mensurar área de janela, quando se utiliza iluminação natural e ventilação híbrida. Suas conclusões mostraram um potencial de diminuição de até 64,9% do consumo energético de edifícios.

Pietzsch (2012) adotou o sistema de ar condicionado VRF (fluxo refrigerante variável) para o edifício da Escola de Engenharia Nova da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sugerindo meios de eficiência energética. Este sistema é semelhante ao tipo *Split*, porém para uma única condensadora é possível acoplar diversas evaporadoras, o VRF gera uma boa economia de energia, já que possui componentes eletrônicos que permitem variar a vazão de refrigerante de acordo com a carga térmica do ambiente, ocasionando o uso de menos potência da condensadora. Em seu trabalho, foi utilizado o *software EnergyPlus v7.0.0* (DOE, 2015) a fim de simular a geometria e sistemas do edifício, alcançando uma redução no consumo energético de 20% ao ano. No seu trabalho foram empregues películas nos vidros, e uso de lâmpadas de LED (*Lighting Emitting Diode*) nas simulações, mostrando uma diminuição dos controles automáticos de iluminação, e uma diminuição da potência instalada.

### 2.8.1 Envoltória de Edificações

Conhecida como a cobertura do edifício, i.e., são as fachadas que dividem o interior do ambiente e do seu exterior. Seus materiais e elementos construtivos determinam como o edifício responderá às condições climáticas externas (MMA, 2021).

De acordo com Lamberts (2004), a parcela principal de ganhos térmicos em uma edificação vem de frações da radiação solar que são conduzidos para dentro através da envoltória, que é separada em duas categorias: fechamentos opacos e fechamentos translúcidos.

A propagação do calor nos fechamentos opacos ocorre no momento em que há uma diferença de temperatura entre as áreas internas e externas, sendo a direção do fluxo de calor, da área mais quente para a mais fria (Lamberts, 2004). Um exemplo de fechamentos opacos são as paredes.

Fechamentos translúcidos são os grandes causadores de trocas térmicas em edifícios. Nessa categoria de fechamento, podem acontecer três formas de trocas térmicas: condução, convecção e radiação. Relacionado às duas primeiras trocas, o desempenho é parecido com os fechamentos opacos; a distinção aparece na troca de calor por radiação, que é manifestada quando relacionada aos fechamentos opacos (Lamberts, 2004).

### 2.8.2 Propriedades Físicas dos Elementos Construtivos

A seguir, serão mostradas as propriedades físicas mais relevantes dos elementos construtivos.

#### a) **Condutividade Térmica ( $\lambda$ )**

Proporcional à densidade do objeto e configura a capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo. Sua unidade é (W/m.K).

#### b) **Resistência Térmica ( $R$ )**

É a propriedade que determina a resistência do material em relação à troca de calor.  $R$  é diretamente proporcional a espessura do objeto, ( $L$ ) é inversamente proporcional à  $\lambda$ . A seguir a expressão matemática que define o valor de  $R$ .

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (15)$$

Onde:

$R$ : resistência térmica [ $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ ];

$L$ : espessura [m];

$\lambda$ : condutividade térmica [ $\text{W}/\text{m}.\text{K}$ ].

### c) Transmitância Térmica (Fator $U$ )

É equivalente ao inverso da resistência térmica, isto é, este fator quantifica a capacidade de conduzir calor de um material, quanto menor for o resultado do cálculo, melhor será o isolamento térmico. Quanto maior o resultado, menor é o isolamento térmico entre os materiais. A seguir a expressão matemática que define o valor de  $U$ .

$$U = \frac{1}{R} \quad (16)$$

Onde:

$U$ : transmitância térmica [ $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ ];

$R$ : resistência térmica do objeto [ $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ ].

### d) Capacidade Térmica ( $C_{Ta}$ )

Mede a propriedade de um objeto em preservar calor, isto é, mostra a fração de energia necessária para variar a temperatura dos elementos de uma unidade de área. A seguir a expressão matemática que define a capacidade térmica de um material.

$$C_{Ta} = L.c.\rho \quad (17)$$

Onde:

$C_{Ta}$ : capacidade térmica do material [ $\text{kJ}/\text{m}^2.\text{K}$ ];

$L$ : espessura do material [m];

$c$ : calor específico do material [ $\text{kJ}/\text{kg}.\text{K}$ ];

$\rho$ : densidade do material [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

### e) Fator Solar (*SHGC*)

Denominado *SHGC* (*Solar Heat Gain Coefficient*), é aplicado em elementos translúcidos. É determinado como a razão entre a parcela de energia solar transmitida através do componente e o total de energia absorvida que nela recai.

### f) Transmitância à Radiação (*VLT*)

Denominada *VLT* (*Visible Light Transmittance*), também é aplicado em elementos translúcidos. É determinado como a razão entre a radiação solar no espectro perceptível que é irradiada através de um componente e o total incidente.

As seções seguintes demonstram alguns atributos da envoltória: o impacto da transferência de calor e a norma de desempenho térmico de edifícios no Brasil.

## a) Mecanismos de Transferência de Calor

A transferência de energia térmica acontece de três formas distintas: condução, convecção e radiação. Todas as formas requerem a desigualdade na temperatura, todos acontecem da maior para menor temperatura, com exceção da radiação térmica, que é capaz de liberar radiação do espaço de menor para o de maior temperatura, ainda que no final o balanço térmico aponta maior fluxo de energia do espaço de maior temperatura para o de menor temperatura (SIEGEL & HOWELL, 2002).

- **Transferência de Calor por Condução**

Na condução, que acontece entre sólidos, a transferência de calor ocorre das regiões de maior energia para aquelas de menor energia. A condução de calor em certo meio é afetada pela composição do material, geometria, espessura, tipo e desigualdade de temperatura em que está inserido (ORDENES & LAMBERTS, 2008).

Conforme Incropera e Dewitt (2003), é possível quantificar processos de transferência de calor em termos de equações de taxas apropriadas. Essas equações podem ser utilizadas para calcular quanta energia é transferida por unidade de tempo, a equação da taxa é conhecida como *Lei de Fourier*, que é representada a seguir.

$$q''_x = -k \frac{dt}{dx} \quad (18)$$

Onde:

$q''_x$  = é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área [W/m<sup>2</sup>];

$k$  = condutividade térmica [W/m.K];

O sinal negativo é uma consequência de o calor ser transferido na direção da temperatura decrescente.

- **Transferência de Calor por Convecção**

É a forma de transferência de energia entre fluidos (gases ou líquidos) que está se deslocando e que contém os resultados definidos de condução e movimento do fluido (ÇENGEL e GHAJAR, 2012).

Se dá na presença de fluidos (líquidos ou gases) com a movimentação ascendente de correntes quentes e descendente de correntes frias, originadas na diferença de densidade observada pelos efeitos da dilatação térmica no fluido (Incropera & DeWitt, 2011).

A equação apropriada para a taxa de transferência é conhecida como a *Lei do resfriamento de Newton*, e possui a seguinte forma.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (19)$$

Onde:

$q''$  = fluxo de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>], e é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido,  $T_s$  e  $T_\infty$ , respectivamente;

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>.K].

- **Transferência de Calor por Radiação**

É caracterizada pela propagação de ondas eletromagnéticas, não existe obrigação de um meio físico, sendo capaz de realizar-se no vácuo. A emissão de radiação é máxima na circunstância abstrata de corpo negro, contudo todos os materiais emitem somente uma parcela de energia dessa totalidade do corpo negro (Incropera & DeWitt, 2011). A parcela é intitulada emissividade ( $\epsilon$ ).

A radiação emitida pela superfície se origina na energia térmica da matéria delimitada pela superfície e a taxa que a energia é liberada por unidade de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), conhecida como *poder emissivo*,  $E$ , da superfície. A expressão matemática é determinada pela *Lei de Stefan-Boltzmann*.

$$q'' = \sigma \varepsilon T_s^4 \quad (20)$$

Onde:

$q''$  = fluxo de calor por unidade de área [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

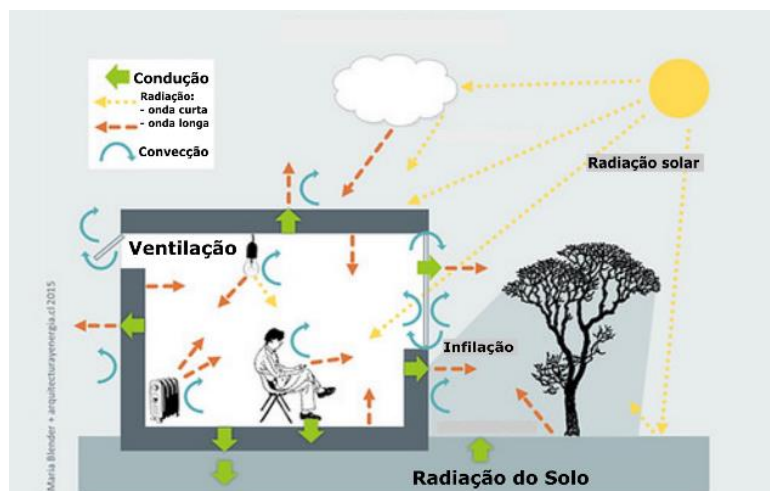
$\sigma$  = constante de *Stefan-Boltzmann* [ $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ];

$\varepsilon$  = emissividade do material;

$T_s$  = temperatura da superfície.

No decorrer da simulação todas as formas de TRC apresentadas acima são utilizadas para estabelecer o curso total de calor internamente ou externamente no ambiente. Por consequência, a proporção energética da cobertura da construção é determinada como a desigualdade por meio da energia que se integra e que sai, carecendo disto ser similar à alteração de energia na parte interna da cobertura, ou seja, a proporção energética de uma construção é baseada na primeira lei da termodinâmica, a lei da conservação da energia.

A Figura 2 mostra as correntes de ar internas e a carga térmica decorrente dos elementos da edificação, tendo em consideração a geração interna de aquecimento por pessoas e dispositivos, além das interferências das circunstâncias no exterior do ambiente.



**Figura 02 – Ferramentas de Troca de Calor Dedicadas a Edificações.**

**Fonte: Adaptado de Arquitectura & Energía (2021).**

- **Transferência de Calor em Superfícies**

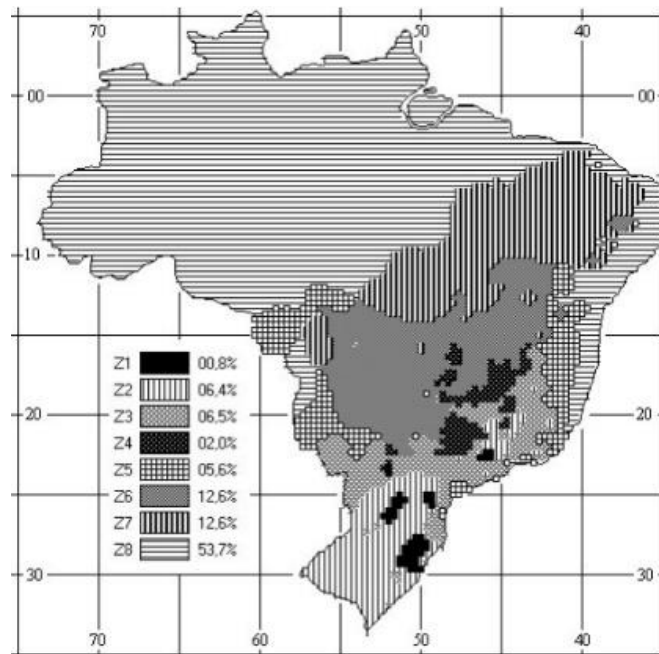
De acordo com Çengel e Ghajar (2012), é possível definir a taxa de transferência de calor através de alguma fração de parede ou teto de um edifício pela relação:

$$Q = UA(T_i - T_o) = \frac{A(T_i - T_o)}{R} \quad (21)$$

Onde  $T_i$  e  $T_o$  são as temperaturas do ar,  $A$  área da transferência de calor,  $U$  é o coeficiente global (fator  $U$ ) e  $R = 1/U$  (valor  $R$ ) é a resistência térmica global unitária.

### b) Norma de Desempenho Térmico de Edificações

No Brasil a norma é a NBR 15220-3/2005, que exibe instruções positivas para planejamento bioclimático do país. Em cada área são determinados critérios de medida dos pontos para ventilação, preservação das aberturas, fechamento das paredes de fora e planos de automatização térmica passiva. São repartidas oito regiões climáticas, como mostra a Figura 3.



**Figura 03 – Divisão de Áreas Bioclimáticas Brasileiras.**

**Fonte: NBR 15220-3 (2005).**

### 2.8.3 Janelas com Controle de Fluxo de Ar

É um sistema que caracteriza o mecanismo de controle para janelas onde o ar é obrigado a se deslocar pelas frestas entre as lâminas de vidro. Esse tipo de janela é conhecido como “janelas com controle de fluxo de ar” ou *airflow windows*. Além disso, são chamadas de janelas climáticas ou janelas extratoras de calor (RAFFNSØE, 2007).

Uma de suas aplicações é diminuir a carga de uma área pressionando um sistema de exaustão do ar que está no interior através da janela. Para locais onde existe refrigeração, este sistema perde uma parcela do calor absorvido do sol pelos vidros da janela (e caso existam, das cortinas e películas). Para locais onde existe aquecimento, a corrente de ar aquece o vidro, diminuindo a perda de calor pelas janelas. Por consequência, o benefício alcançado é o aumento do conforto térmico. Isto ocorre devido a parte interior da janela ser mais fria no verão e mais quente no inverno.

### 2.8.4 Controle de Potência de Iluminação

Nesse método os níveis de iluminação natural são calculados e utilizados para definir o quanto de iluminação artificial pode ser diminuído (Torres, 2011) e (Siqueira, 2011). O grau de iluminação natural em uma área é função de alguns fatores, sendo, posição solar, localização, tipos de películas e/ou cortinas e refletância de superfícies internas. A diminuição do uso de energia elétrica é consequência do nível de iluminação natural do *setpoint* de iluminação, tipo de controle e fração de área controlada.

É relevante destacar que para grandes ambientes, é recomendado que se faça o uso de mais de um ponto de referência para o sensor, e que esses pontos estejam arrançados de forma simétrica no local.

Há dois tipos de controle de iluminação. O primeiro é o controle contínuo que opera de forma contínua e linear da máxima a mínima energia elétrica com o crescimento da iluminação natural, respectivamente. As luzes encontram-se no ponto mínimo mesmo com a ampliação da iluminação natural. O segundo é o controle por degrau (*step*), onde existe uma variação discreta e variação em degraus equivalentes da energia elétrica de entrada e a luz de saída. A Figura 4 mostra o esquema dos dois sistemas.

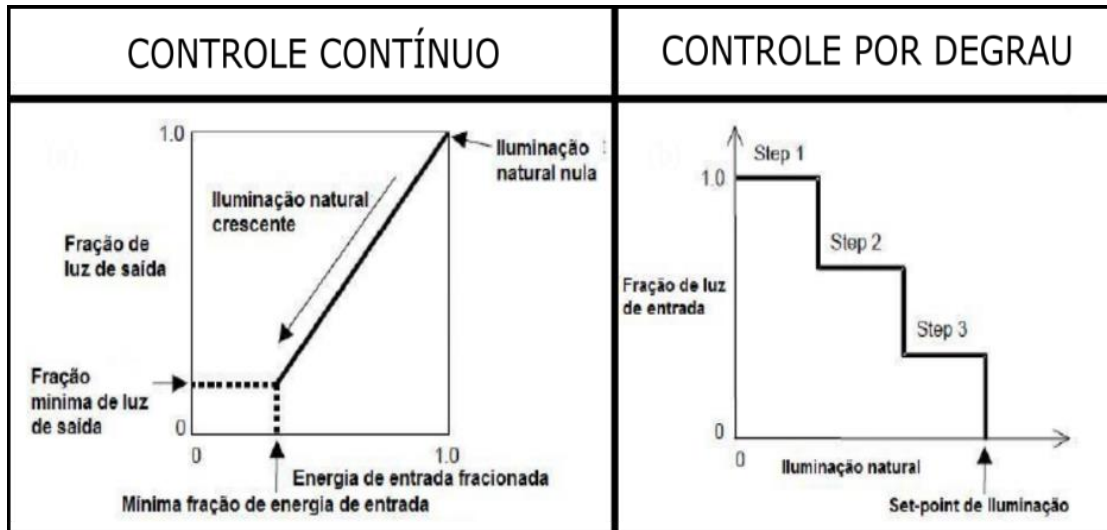


Figura 04 – Esquemas de Controle Contínuo e Controle por Degrau.

Fonte: Adaptado de MÜLLER, Rafael Walter (2013).

### 2.8.5 Consumo Energético de Edificações

O custo elétrico é compreendido através da divisão de sistemas: equipamentos elétricos, climatização e iluminação. O desenvolvimento desses sistemas no decorrer do tempo é melhorado para o aumento da eficiência e redução de custos. Os itens a seguir exibem os atributos e relações dos sistemas.

#### a) Sistemas de Iluminação

As técnicas de iluminação artificial elétrica receberam vários avanços ao longo dos anos. As primeiras introduzidas foram as lâmpadas incandescentes, mas estas se mostraram grandes fontes de calor, e assim geram um aquecimento não desejado dentro dos ambientes. As lâmpadas que obtiveram parte do comércio com uma vida útil maior e com o consumo menor foram as fluorescentes, entretanto elas ainda compartilhavam do mesmo problema das incandescentes. E, na atualidade, o LED (*Light Emitting Diode*) toma o espaço dos outros sistemas já que seu consumo é bem menor se comparado às outras e sua vida útil é significativamente maior (Beltram, 2015).

Conforme o Departamento de Energia dos EUA (2008) os esquemas de iluminação no interior de edifícios são encarregados pelo consumo de aproximadamente 25% da energia. Desse modo, o aperfeiçoamento desses sistemas corresponde forte importância a planos de eficiência energética.

Em seguida serão exibidas definições e conceitos referentes a sistemas de iluminação, tal como a normalização de sistema de iluminação (NBR ISO 8995-1, 2013).

- **Fluxo luminoso** [ $\phi$ ]: corresponde na proporção básica da parcela de luz exposta por uma fonte de luz que é capaz de gerar estímulo de imagem, medido em lúmen (lm), e também é utilizada como base para calcular a iluminância e a eficiência luminosa;
- **Eficiência luminosa** [ $E$ ]: qualifica a parcela de lúmens emanados da lâmpada para cada fração de energia utilizada, então, o fluxo causado pela fonte é dividido pelo consumo de potência elétrica, medido em lúmen por watt (lm/W);
- **Iluminância** [ $I$ ]: examina a quantidade de luz que cai e ilumina certa área ou superfície, aderindo o valor médio por causa da desigualdade do curso do fluxo luminoso de uma fonte, medido em (lm/m<sup>2</sup> ou lux).

Levando em conta essas definições, condições de iluminação em locais de trabalho são determinados pela NBR ISO 8995-1 (2013), essa norma tem como base o grau de iluminância para qualquer atividade e espaço, da mesma forma que engloba outras questões como a temperatura de cor e a limitação para fins como cintilação. A seguinte imagem mostra os níveis de iluminância determinados pela Norma Brasileira.

	ILUMINÂNCIA (lux)	TIPO DE AMBIENTE / ATIVIDADE
CLASSE A (áreas de uso contínuo e/ou execução de tarefas simples)	20 - 30 - 50	- ruas públicas e estacionamentos
	50 - 75 - 100	- ambientes de pouca permanência
	100 - 150 - 200	- depósitos
CLASSE B (áreas de trabalho em geral)	200 - 300 - 500	- trabalhos brutos e auditórios
	500 - 750 - 1.000	- trabalhos normais: escritórios e fábricas
	1.000 - 1.500 - 2.000	- trabalhos especiais: gravação, inspeção, indústrias de tecidos
CLASSE C (áreas com tarefas visuais minuciosas)	2.000 - 3.000 - 5.000	- trabalho contínuo e exato: eletrônica
	5.000 - 7.500 - 10.000	- trabalho que exige muita exatidão: placas eletro-eletrônicas
	10.000 - 15.000 - 20.000	- trabalho minucioso especial: cirurgia

Figura 05 – Determinações dos Graus de Iluminância.

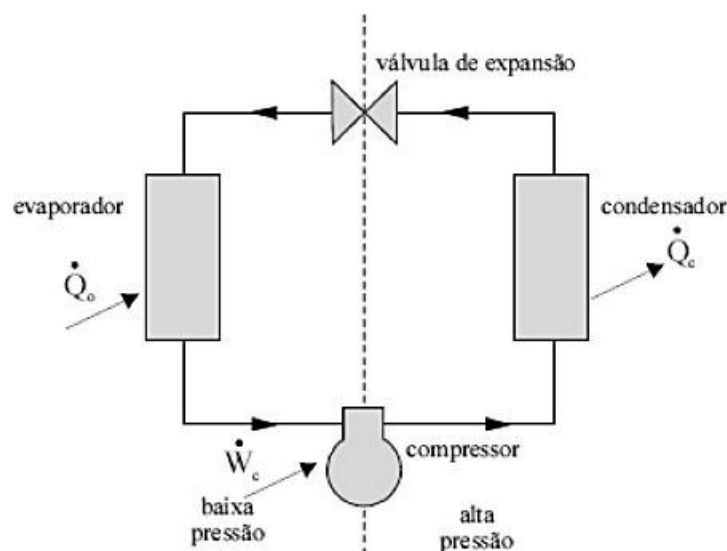
Fonte: NBR ISO 8995-1 – Iluminação de ambientes de trabalho (ABNT, 2013).

## b) Sistemas de Climatização

Estão encarregados da calefação e refrigeração de áreas e equivalem aproximadamente 33% do consumo energético de um edifício (DOE - *Department of Energy*, 2008). Assim sendo, meios de eficiência energética empregadas a esses sistemas geram impactos consideráveis no uso energético total desta seção.

No Brasil esses sistemas são chamados de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). No enredo brasileiro geralmente se trabalha com sistemas de ventilação e refrigeração, raramente são usados sistemas de calefação ou aquecimento.

Dispositivos de condicionamento do ar operam com a compressão de um fluido refrigerante, que em seguida se expande e ganha calor do ambiente a ser resfriado no andamento da refrigeração (França, s.d.). A Figura 6 mostra um ciclo simples de refrigeração.



**Figura 06 – Diagrama Característico do Ciclo Simples de Refrigeração.**

**Fonte: IEMA/ES (2007).**

Percebe-se que o ciclo opera através da transferência de calor do evaporador para o condensador. No evaporador, o fluido refrigerante recebe o calor existente no ar do local a ser resfriado e evapora. Nesta forma gasosa, o fluido é admitido no compressor, onde é comprimido para assim, percorrer o condensador e rejeitar calor para o meio exterior, condensando-se para completar o ciclo, após o fluido sair do condensador, ele é admitido na válvula de expansão, onde é expandido e resfriado, mantendo-se na fase líquida. (BELTRAM, 2015).

São usadas e avaliadas metodologias complexas dos sistemas AVAC. Um dos itens mais relevantes para ser avaliado é o nível de desempenho (PROCEL, 2005).

$$COP_R = \frac{Q}{P} \quad (22)$$

Onde:

$Q$ : calor transmitido;

$P$ : carga elétrica utilizada.

### c) Ciclo de Refrigeração

É um sistema térmico que constantemente transfere calor de uma área de menor para de maior temperatura. Já que esse fluxo difere do sentido natural do calor, só se torna possível utilizando energia externa (BEYER, 2011).

O intitulado Coeficiente de Performance ( $COP$ ) de uma ferramenta com a razão através do calor transferido e a energia de fora utilizada. A seguir as expressões matemáticas do  $COP$ :

$COP$  de refrigeração:

$$COP_R = \frac{Q_e}{W_e} \quad (23)$$

$COP$  de aquecimento:

$$COP_A = \frac{Q_s}{W_e} \quad (24)$$

Onde:

$COP_r$ : coeficiente de performance para o ciclo de refrigeração;

$Q_e$ : calor transferido na refrigeração;

$COP_a$ : coeficiente de performance para o ciclo de aquecimento;

$Q_s$ : calor transferido no aquecimento.

- **Tipos de Sistemas de Condicionamento de Ar**

São várias as tecnologias, conforme o nível de capital programado e a capacidade total de atendimento. Sistemas simples englobam em um dispositivo todos os elementos, e são apropriados para locais pequenos. Alguns sistemas são classificados como complexos por

possuírem controladores para execução conforme *setpoints* de um termostato fixado, como *Splits*, em que o evaporador e o condensador são destacados, e *Multi splits*, onde diversos evaporadores estão fixados em somente um condensador central (PROCEL, Sistemas de Ar Condicionado, 2011).

Hoje em dia, dos avaliados como mais eficazes, tem-se o VRV (*Variable Refrigerant Volume*), que tem controle dinâmico, onde a quantidade de fluido refrigerante comprimido é regulado de acordo com o erro estimado pelo controlador.

#### d) Instrumentos Elétricos

Segundo a PROCEL – Eletrobrás (2007), aproximadamente 31% do uso energético de um edifício é relacionado a aparelhos elétricos, mostrado na Figura 7. Isso pode ser explicado pelo aumento da quantidade de equipamentos eletrônicos que vem chegando no mercado e sua inclusão nas tarefas diárias, ocasionando um maior consumo energético de um edifício.

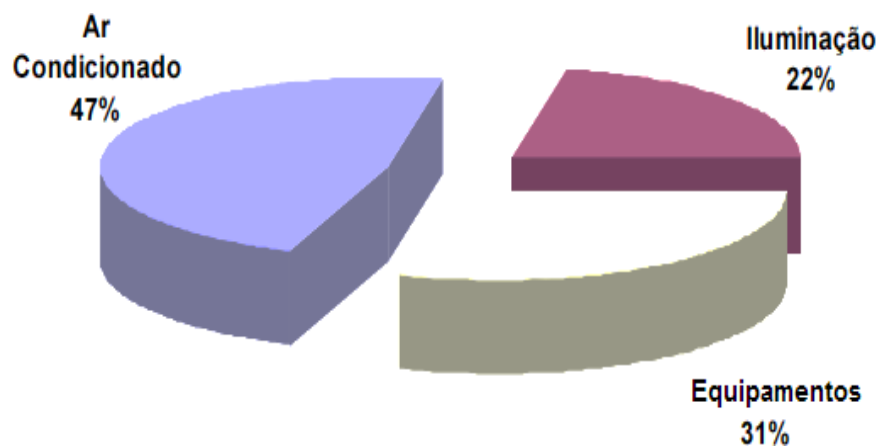


Figura 07 – Divisão do Consumo por Uso Final.

Fonte: Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil. (PROCEL - Eletrobrás, 2005).

Pode-se observar que, os aparelhos elétricos e procedimentos de climatização e iluminação configuram sucintamente todo o consumo de energia elétrica de uma construção. A seleção desses sistemas é determinante no funcionamento de cada estrutura, em relação ao seu consumo energético e à sua reação térmica.

Desse modo, com objetivo de dimensionar tais sistemas com maior precisão e avaliar a demanda em um edifício durante longos períodos, a simulação computacional termoenergética tem sido bastante aplicada, se tornando uma ferramenta importante para avaliação de soluções

passivas e ativas que objetivam ter melhores condições de conforto e consumo de energia otimizado.

## 2.9 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM EDIFICAÇÕES

De acordo com Mendes *et al* (2005), é um trabalho complicado avaliar o desempenho energético em edificações pois inclui uma quantidade grande de aspectos interdependentes e definições multidisciplinares. O avanço da informática possibilitou que sistemas físicos que retratam o comportamento energético e térmico nos edifícios fossem produzidos, proporcionando a simulação em diversos cenários.

É fundamental a utilização de simulações computacionais para calcular parâmetros do uso de energia em edificações, visto que isso possibilita definir as reações térmicas e energéticas das edificações (Mendes, 2005). Em consequência disso, nos EUA foram gerados vários sistemas computacionais que fazem os cálculos do desempenho termoenergético, como *Radiance*, DOE-2 e *EnergyPlus*. O último mencionado é destacado pelo grau de integração e estrutura de cálculos referentes a iluminação, umidade, temperatura do ar, ventilação pelas aberturas, e outros (Leite, 2016).

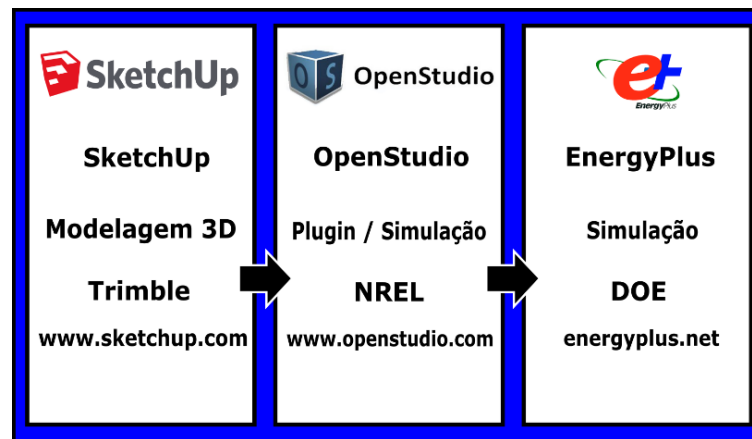
De acordo com Sousa, Nobre & Andrade (2022), a partir de simulações computacionais é possível investigar numericamente as condições climáticas para qualquer período, usando arquivos climáticos diferentes. O arquivo climático disponível no repositório do *software EnergyPlus* é processado no *software* para a obtenção das temperaturas médias mensais e anual, que são então confrontadas com as correspondentes temperaturas que constam no arquivo climático disponibilizado na base dados *CLIMATE-DATA.ORG* referentes a cidade de Belém-PA. Os resultados obtidos mostraram variações de temperaturas médias, mínima e máxima de 0,1°C e 1,7°C, sugerem um bom grau de confiança no algoritmo de processamento dos dados climáticos do *EnergyPlus* na obtenção das referidas temperaturas.

Sousa, Nobre & Ribeiro (2021) expressam que inicialmente o desenho arquitetônico é feito via *software SketchUp*, a partir disso os elementos construtivos são criados e configurados a partir do *plugin OpenStudio* e vinculado ao *EnergyPlus*, para a simulação estar completa.

Resumidamente, as ferramentas de simulação computacional se constituem em vários dados de entrada disponibilizados pelo utilizador para cumprir suas práticas de cálculo para fluxo térmico e balanço energético em cada área e elemento do edifício. Em seguida os tópicos que determinam estes dados:

- Cobertura: um molde de um edifício pode ser gerado em parâmetros de produção CAD (*Computer Aided Design*);
- Estrutura: descrição e propriedades dos materiais internos e externos usados na construção, como especificados na norma NBR 15520-2/2005;
- Dados de utilização: os materiais aplicados no edifício são descritos pela norma NBR 15575/2013. Os sistemas de iluminação e os moldes são referentes à NBR ISO 8995-1/2013 e a metodologia de climatização à ASHRAE 90.1;
- Circunstâncias externas: arquivos climáticos com os perfis ambientais da área geográfica do edifício.

Os métodos mais utilizados para efetuar simulações computacionais são baseados no composto dos *softwares SketchUp*, *OpenStudio* e *EnergyPlus*, que apresentam várias atribuições no decorrer da simulação, como mostra o seguinte diagrama.



**Figura 08 – Diagrama dos *Softwares* de Simulação Computacional.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 2.9.1 *Sketchup*

*Software* desenvolvido para modelar em 3D seja qual for o ambiente. Ele tem muitas utilidades que permitem gerar ítems básicos até as mais difíceis construções industriais ou residenciais. Foi utilizada a versão de teste do *SketchUp 2021 v21.0.391* para modelar o edifício institucional na simulação deste trabalho.

### 2.9.2 *OpenStudio*

*Plugin* desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, com objetivo de facilitar a produção e edição de áreas e superfícies para o *EnergyPlus* sem desconsiderar o

modelo 3D. O referido *software* é o *OpenStudio* que permite a transferência dos desenhos do *SketchUp* ao *EnergyPlus*. Ao instalar o *OpenStudio* são adicionados novos instrumentos de trabalho ao *SketchUp*, possibilitando a edição dos atributos do molde 3D.

Por conta da ajuda de vários desenvolvedores interessados em razão da sustentabilidade, o *software* atualmente conta com vários conjuntos de funções, e.g.: classificação de ocupação do edifício por área; apresentação das camadas para criação de áreas; descrição das propriedades dos materiais utilizados na edificação.

Partindo do *OpenStudio*, é gerado um arquivo no formato *input data file (.idf)* que guarda todas as informações do modelo 3D como materiais usados e dimensões da construção, possibilitando aplicar esses dados no *software EnergyPlus*.

### 2.9.3 *EnergyPlus*

Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos o *EnergyPlus* é um *software* de simulação termoenergética que foi feito baseado em dois *softwares* americanos desenvolvidos para serem instrumentos de simulação de energia e carga térmica: DOE-2 (*Department of Energy software*) utilizado para consumo energético e BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) utilizado em desempenho energético.

Fundamentado nos princípios de balanço de massa e energia (1ª Lei da Termodinâmica) o *software* se baseia em atributos de um edifício a partir da concepção da estrutura física do mesmo, sistemas mecânicos e outros associados, o *EnergyPlus* simula a refrigeração e aquecimento essenciais para preservar os dados nominais de controle térmico, consumo energético e circunstâncias durante o uso de um sistema secundário de climatização. Baseado nos detalhes descritos, entre outros, o *software* simula uma forma bem realista (USDOE, 2013).

As circunstâncias a seguir são classificadas para a atuação do balanço de energia:

- Temperaturas de áreas semelhantes;
- Radiações curtas e longas de onda;
- Troca de radiação entre espaços;
- Condução dentro do componente.
- 

De acordo com Strand *et al* (2001) através do *EnergyPlus*, três níveis de balanço de energia em paredes de construções são possíveis de observar, analisando o balanço através de áreas internas e externas junto com a quantidade de ar do local como é mostrado a seguir.

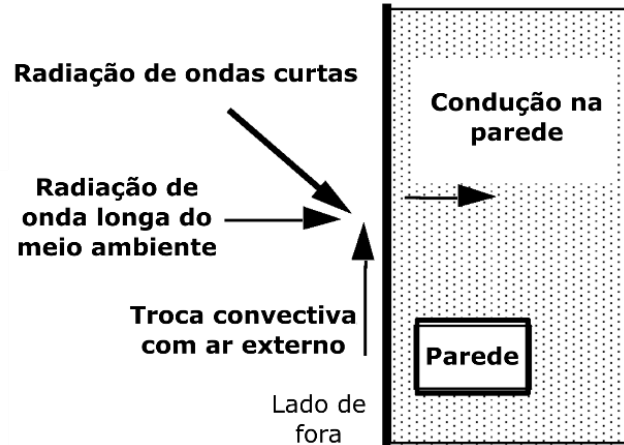


Figura 09 – Diagrama: Volume de Controle do Equilíbrio de Calor em Superfícies Externas.

Fonte: Adaptado de EnergyPlus (2021).

O balanço de energia das superfícies externas considera a radiação, a condução e a convecção de calor. A radiação de onda curta inclui a radiação solar direta e difusa incidente na superfície e, é influenciada pela localização, inclinação da superfície, propriedades dos materiais e condições climáticas. O cálculo do fluxo de calor é feito por meio da absorção de temperaturas e por fator de forma.

Baseado nas informações de construção do edifício detalhado no projeto arquitetônico, considerando atributos físicos do mesmo, arquivo climático da zona onde encontra-se a construção, o *EnergyPlus* irá simular as cargas de aquecimento e refrigeração indispensáveis para conservar a energia gasta e promover o conforto térmico para tal (LBNL, 2010).

Para demonstrar o procedimento de simulação que foi desenvolvido no *EnergyPlus*, a seguir a Figura 10 mostra a interface dos parâmetros do *software*.

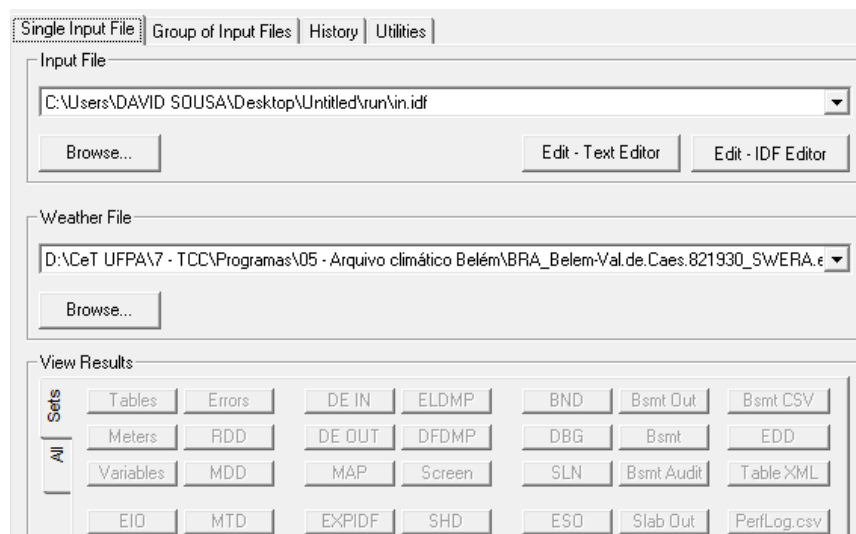


Figura 10 – Interface de Simulação – *EnergyPlus* v9.6.0.

Fonte: Autoria Própria.

O *EnergyPlus* trabalha com módulos utilizados juntos para fazer o cálculo preciso do aquecimento e resfriamento de uma construção, usando uma vasta gama de fontes de energia e sistemas. (ENERGYPLUS, 2013).

O programa foi desenvolvido em linguagem *Fortran 90* onde foi possível definir uma simples estrutura modular que facilita a relação com outros *softwares* além do acréscimo de módulos e rotinas (LBNL, 2010).

Os módulos que o *EnergyPlus* trabalha são: balanço de calor nas superfícies, balanço de aquecimento do ar e da simulação dos sistemas do edifício, de acordo com o seguinte diagrama.

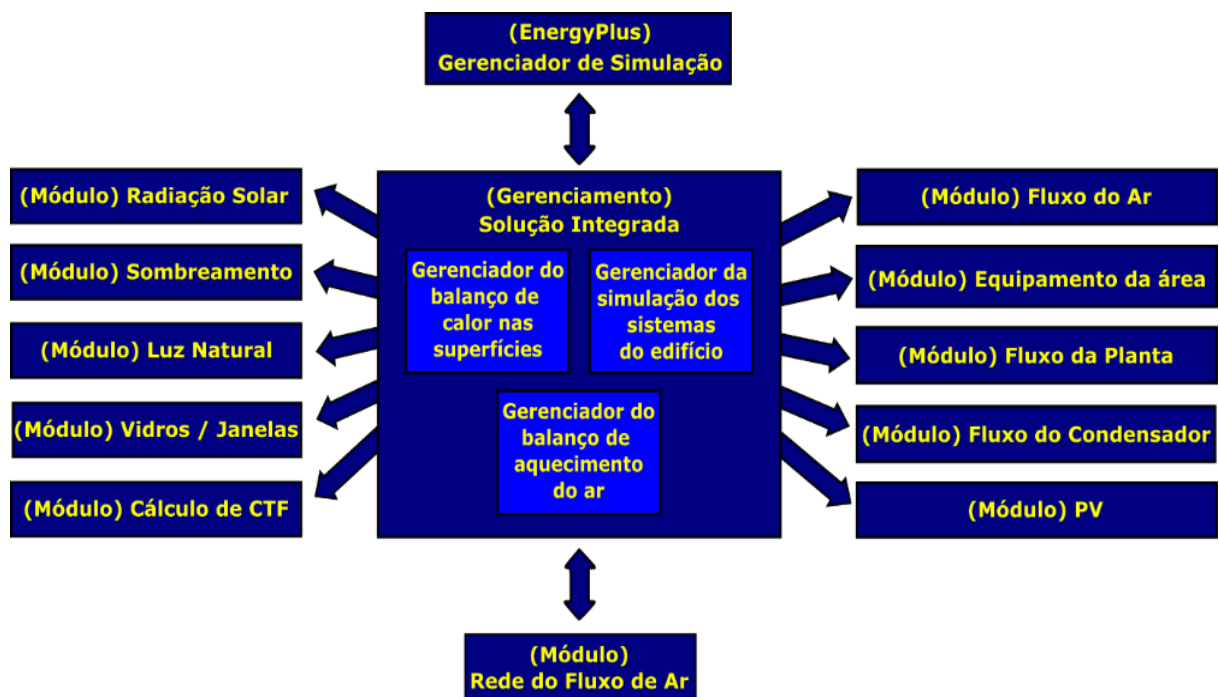


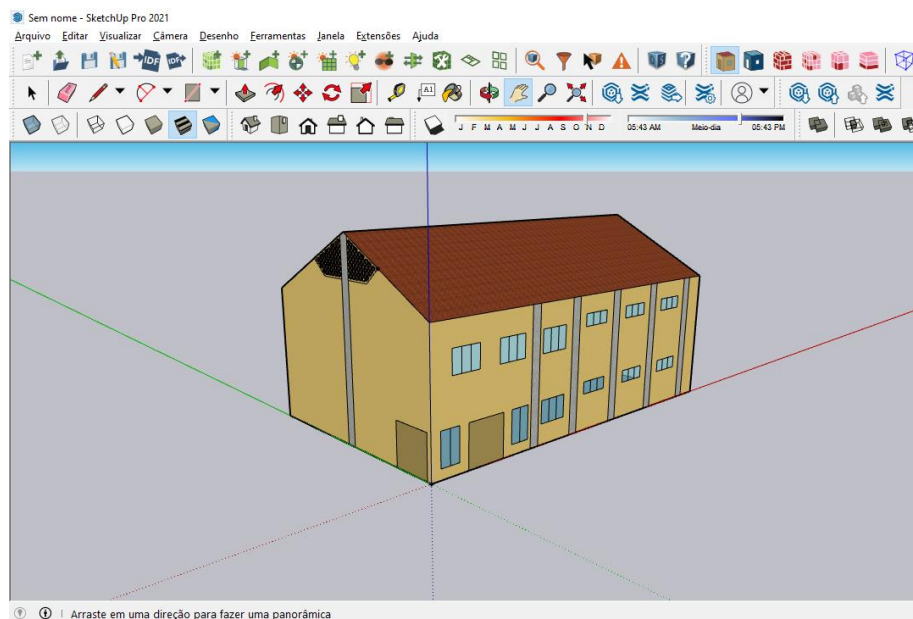
Figura 11 – Diagrama de Gerenciamento por Módulos do *EnergyPlus*.  
Fonte: Adaptado de ENERGYPLUS (2013).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 MÉTODOS UTILIZADOS

Para o cálculo do desempenho térmico, inseriu-se no *software* os dados estruturais da construção, agenda de atividades (perfil de uso do prédio) e consumo dos equipamentos elétricos. Com isso o *software EnergyPlus* cria zonas térmicas para cada unidade, logo, é feita a comparação da temperatura encontrada dessas zonas térmicas com os parâmetros estabelecidos pela ISO 9241/2011 e constatando se as zonas estão dentro dos padrões térmicos (bem-estar térmico ou desconforto térmico).

Um modelo geométrico da construção simulada em formato 3D (Figura 12), foi desenvolvido utilizando o *software SketchUp 2021 v21.0.391*, que em paralelo ao *software OpenStudio v3.3.0*, cria um arquivo com a extensão “.idf” que é usado na simulação via *software EnergyPlus v9.6.0*. O edifício foi modelado respeitando a divisão das zonas térmicas presentes no projeto.



**Figura 12 – Edifício Modelado no Software SketchUp 2021 v21.0.391.**

**Fonte: Autoria Própria.**

O arquivo “.idf” contém dados da dimensão do edifício, elementos construtivos, condições climáticas da área, posição e orientação geográfica, sistemas de condicionamento de ar, cargas térmicas de dispositivos e equipamentos, entre outros. Este arquivo “.idf” foi introduzido ao *software EnergyPlus v9.6.0*, realizada a simulação, foram gerados gráficos com os dados de desempenho térmico e consumo energético do edifício no período de um ano.

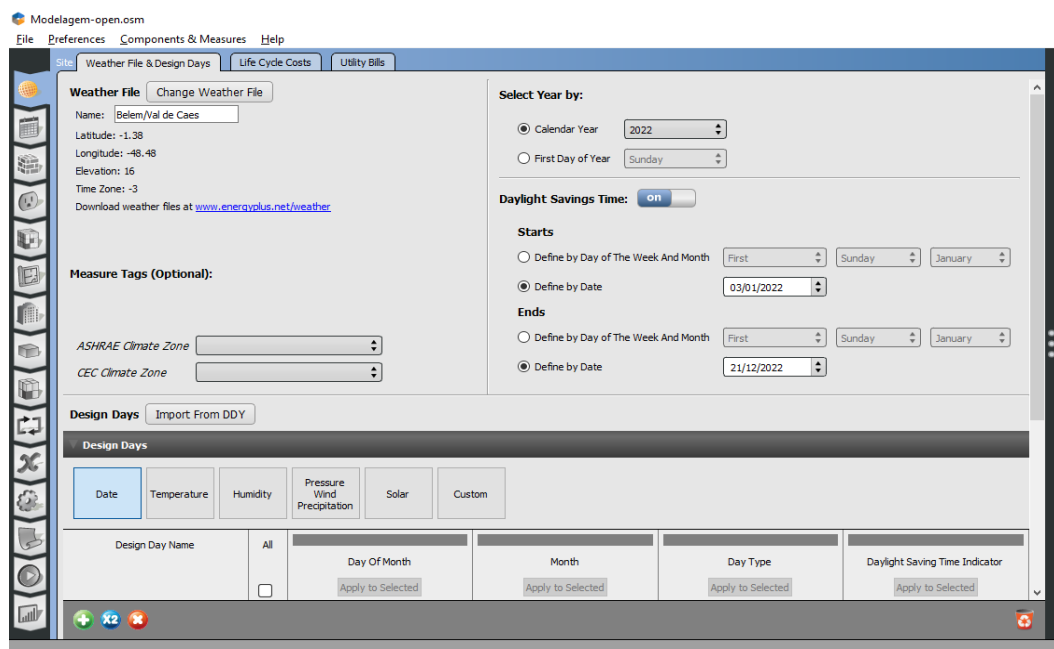
### 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para efetuar esse projeto, foram utilizados recursos destinados a modelagem e simulação, os quais citam-se:

- *Software SketchUp 2021 v21.0.391* (versão de testes);
- *Software OpenStudio v3.3.0 (Plugin)*;
- *Software EnergyPlus v9.6.0*.

### 3.3 SIMULAÇÃO

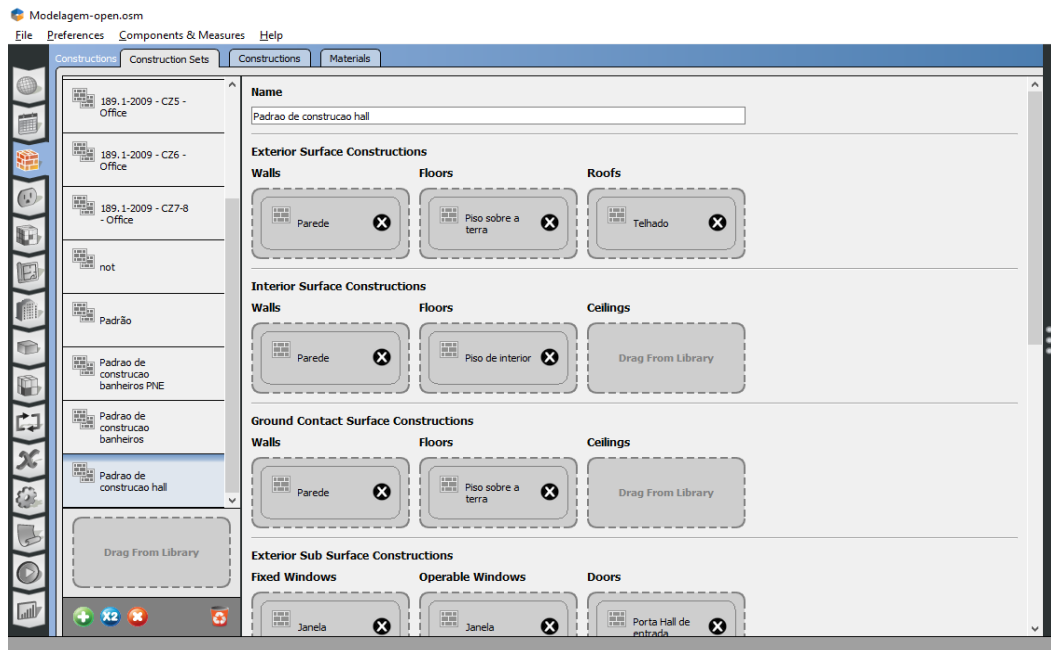
Na aba (*site*) são adicionados os arquivos climáticos da região de estudo, nesse caso foram inseridos arquivos de Belém do Pará no formato SWERA (BRA\_Belem-Val.de.Caes.821930\_SWERA), referente a dados da temperatura do ar, radiação solar, temperatura de bulbos secos e úmidos, entre outros, o arquivo climático funciona a partir das condições de temperaturas, umidade e radiação solar incidente no ambiente. Para a simulação foram determinados alguns parâmetros: horário de funcionamento do prédio, período de um ano (ano letivo), como mostra a Figura 13.



**Figura 13 – Aba Site do OpenStudio v3.3.0.**

**Fonte: Autoria Própria.**

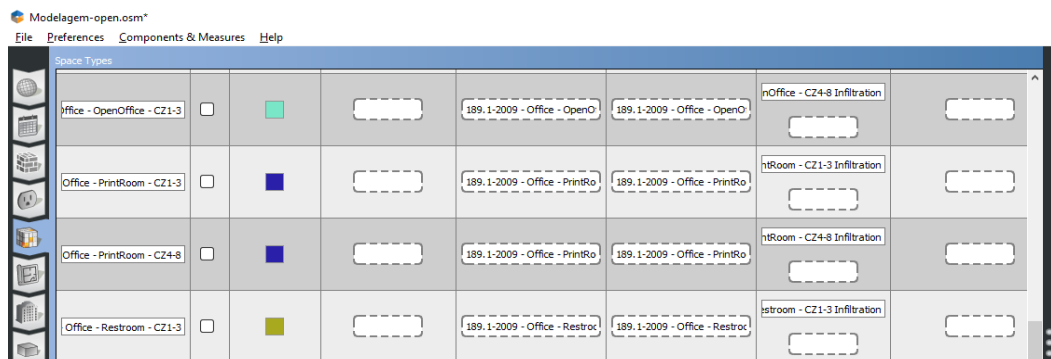
Em seguida, aba (*constructions*) que é uma das principais do *software*, nela são adicionados dados referentes a construção do edifício, dados relacionados ao tipo de material, suas características térmicas e métricas, para então configurar itens do edifício específicos e qual deles está em contato 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 14 – Aba *constructions* do *OpenStudio* v3.3.0.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Na aba seguinte (*spaces types*), importa-se um padrão de edifício do *EnergyPlus*, o arquivo escolhido foi o *openoffice* CZ1-3 representando um escritório padrão dos E.U.A, conforme ilustra a Figura 15.



**Figura 15 – Aba *spaces types* do *OpenStudio* v3.3.0.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Na aba (*geometry*), pode-se visualizar o desenho arquitetônico, que ilustra as zonas térmicas selecionadas em cada ambiente, 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 do edifício 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.

Na Figura 16, aba (*facility*) utiliza-se o padrão do edifício criado na Figura 14, o arquivo é arrastado até a área chamada “*space types*” e o arquivo selecionado na Figura 15 que é o *openoffice CZ1-3* que também é arrastado até a área “*construction sets*”, além disso insere-se a orientação no mapa do edifício, o próprio *software* sugere o posicionamento que é o norte, embora a orientação esteja ligada diretamente a própria residência, a principal função desta aba é facilitar o entendimento do *software* em relação às características do ambiente como um todo, entre outras funcionalidades.

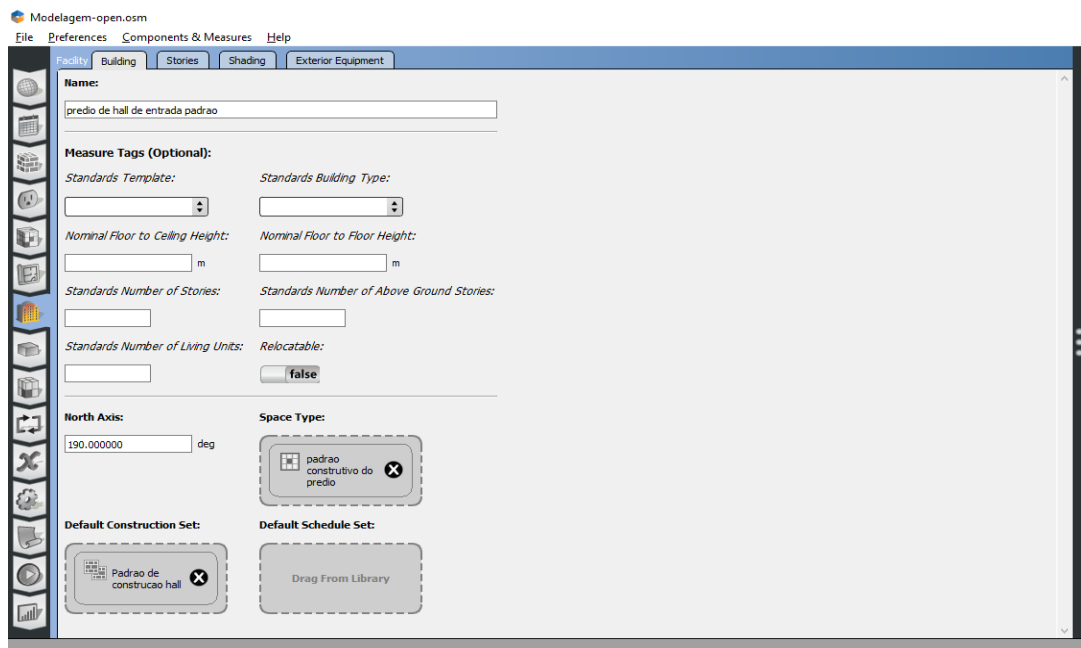
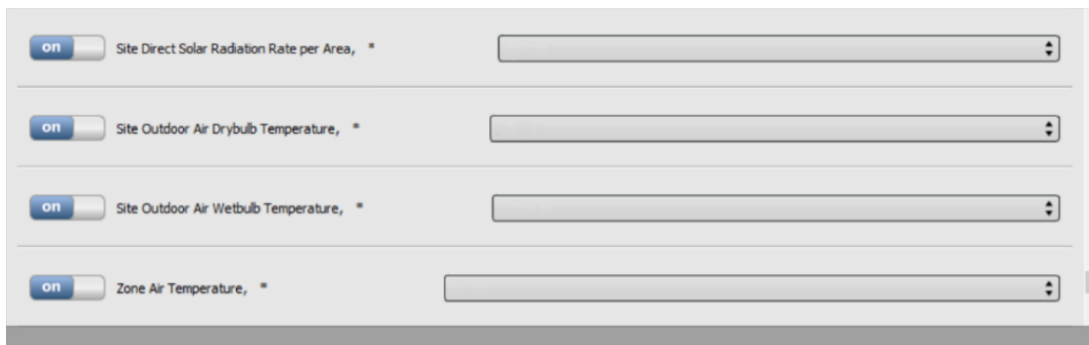


Figura 16 – Aba *facility* do *OpenStudio v3.3.0*.

Fonte: Autoria Própria.

Na aba (*spaces*), são inseridos os arquivos padrões de cada local criado e especificado no *software OpenStudio*, além de permitir modificar áreas de contatos que podem estar incorretas, entre outras funcionalidades.

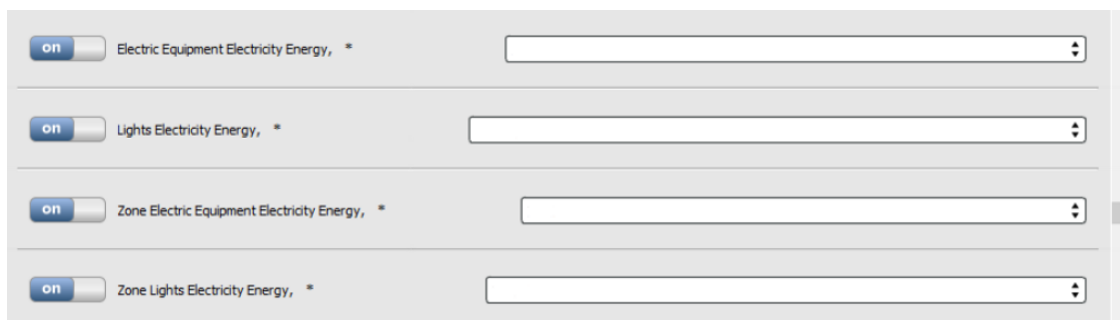
Ao fim de todos os ajustes, são escolhidas as variáveis de saída que se pode trabalhar, sugeridas pelo próprio *software* a fim de simplificar o estudo, foram escolhidas variáveis com impacto significativo da análise de conforto térmico. Variáveis em relação à temperatura do ar (bulbo seco e úmido), radiação solar direta, e as zonas térmicas dos ambientes, como mostra a Figura 17 a seguir.



**Figura 17 – Variáveis de Saída Para Análise dos Resultados da Simulação de Conforto Térmico.**

**Fonte: Autoria Própria.**

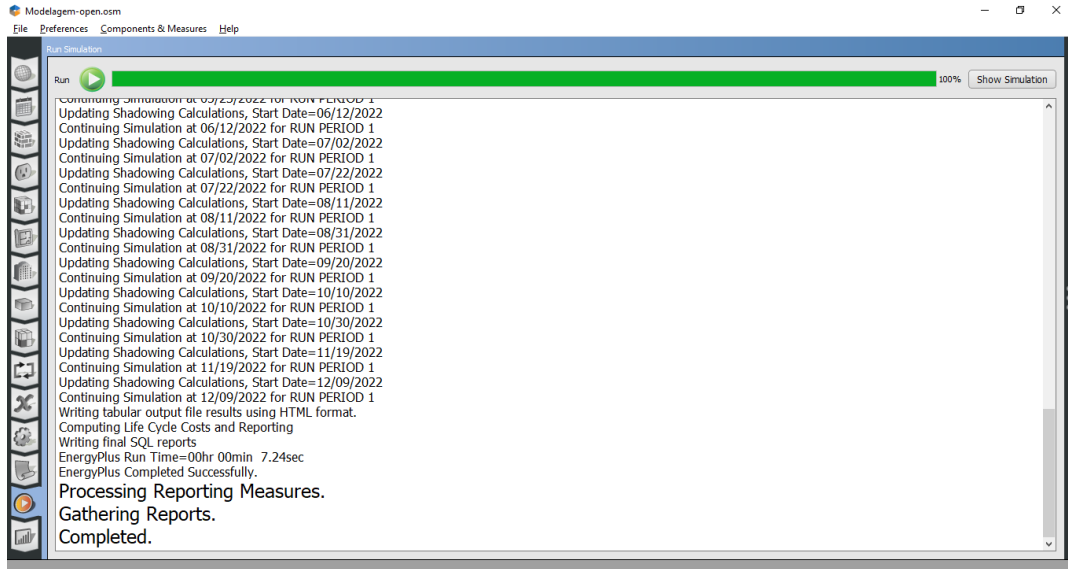
Para análise de geração de energia e consumo energético foram determinadas variáveis em relação à energia elétrica dos equipamentos (por mês), energia de iluminação, energia elétrica dos equipamentos da zona térmica, energia de iluminação da zona térmica como mostra a Figura 18 a seguir. Logo após, a simulação é iniciada gerando relatórios de resultados do *EnergyPlus* que foram convertidos em gráficos.



**Figura 18 – Variáveis de Saída Para Análise dos Resultados da Simulação de Consumo Energético.**

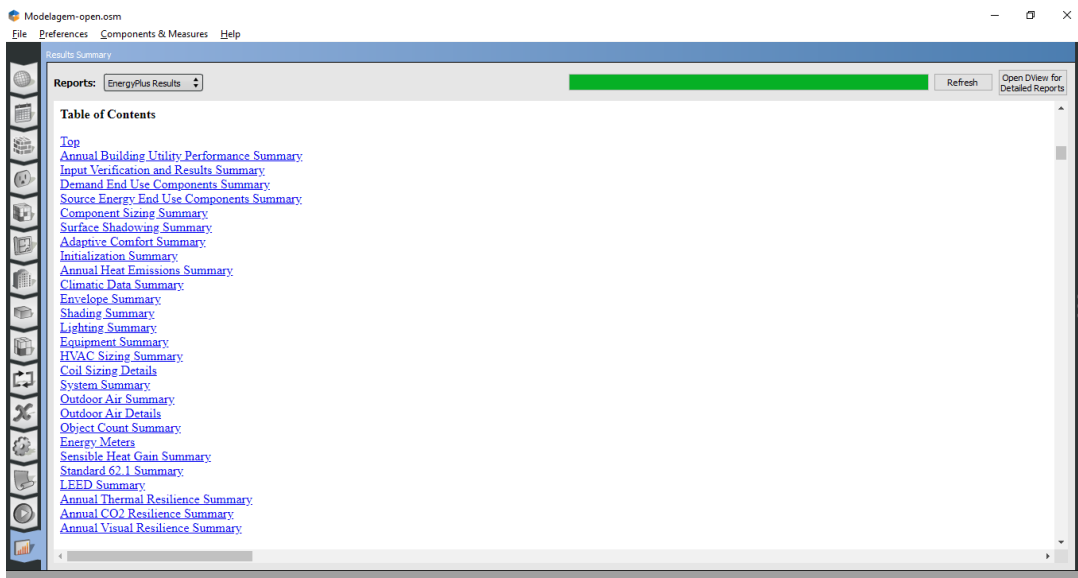
**Fonte: Autoria Própria.**

Nas Figuras 19 e 20, é a parte final da simulação, onde inicia-se a simulação e mostram-se os resultados e relatórios do *software EnergyPlus* por meio de tabelas que foram convertidos em gráficos através do visualizador *DView* do *Plugin OpenStudio*.



**Figura 19 – Run Simulation.**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 20 – Results Summary.**

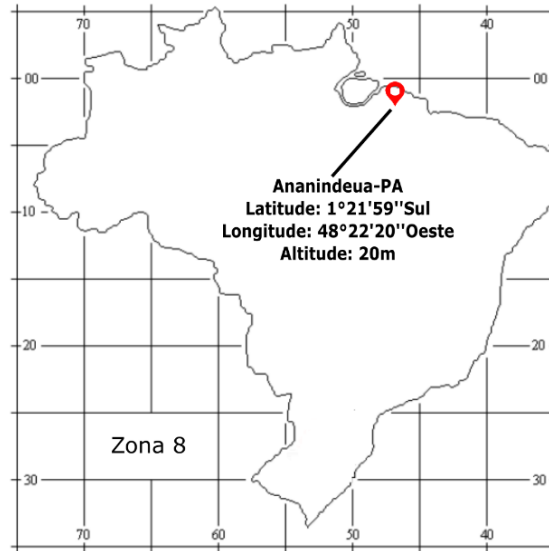
**Fonte: Autoria Própria.**

## 3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO

### 3.4.1 Caracterização da Localização

A simulação do edifício utilizando o *software EnergyPlus v9.6.0* foi feita a partir das informações apresentadas na planta do projeto da construção, localizada no bairro Icuí-Guajará

em Ananindeua-PA, as coordenadas de latitude  $1^{\circ}21'59''$ Sul, longitude  $48^{\circ}22'20''$ Oeste e altitude 20 m, mostradas na Figura 21.



**Figura 21 – Dados de Latitude, Longitude e Altura do Município de Ananindeua-PA.**

**Fonte: Adaptado de Pozza, (2011).**

Ao redor da Av. Independência, além de edifícios residenciais, estão presentes outros tipos como açougue, posto de combustível, supermercado, farmácia, salões de beleza, padaria, paróquia, ginásio, pizzaria, restaurante, loja de roupa, lanchonete, borracharia e etc. A Figura 22 apresenta a localização do bairro, da edificação e ruas principais especificadas na legenda.



**Figura 22 – Localização.**

**Fonte: Google Earth com Adaptação do Autor, (2022).**

### 3.4.2 Informações Para Cálculo do Edifício

Alguns parâmetros de entrada da edificação são: potência dos equipamentos, perfil de atividade no edifício e o arquivo climático referente à localização do edifício. A Tabela 01 a seguir apresenta estas informações.

Dados dos sistemas	Descrição												
Equipamentos	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Equipamento</th> <th>Quantidade</th> <th>Potência (W)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Computador</td> <td>6</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td>Impressora</td> <td>1</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>Lâmpadas</td> <td>26</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Computador	6	500	Impressora	1	70	Lâmpadas	26	25
	Equipamento	Quantidade	Potência (W)										
	Computador	6	500										
	Impressora	1	70										
Lâmpadas	26	25											
Programação de uso	O perfil de uso do edifício baseia-se no tempo de operação das atividades. De segunda a sexta das 7h às 22h.												
Arquivo climático	O arquivo climático utilizado na simulação é o <b>BRA_Belem-Val.de.Caes.821930_SWERA.epw</b> . Fonte: U.S. DOE ( <i>Department of Energy</i> )												

**Tabela 01 – Informações de Cálculo.**

**Fonte: Autoria Própria.**

### 3.4.3 Dimensões Gerais

O edifício proposto para a simulação é composto pelos ambientes: *hall* de entrada; circulação; W.C feminino; W.C feminino PNE; W.C masculino; W.C masculino PNE; escada; sala de acervo técnico; plataforma elevatória p/ PCD; sala bibliotecária; biblioteca acervo e na parte superior a área de leitura. Como mostra a Tabela 02 e as Figuras 23 e 24 a seguir.

Ambientes	Área (m <sup>2</sup> )
Hall de entrada	22,84m <sup>2</sup>
Circulação	7,85m <sup>2</sup>
W.C feminino	13,87m <sup>2</sup>
W.C feminino PNE	4,319m <sup>2</sup>
W.C masculino	18,25m <sup>2</sup>
W.C masculino PNE	4,349m <sup>2</sup>
Escada	8,18m <sup>2</sup>
Sala de acervo técnico	10,72m <sup>2</sup>
Plataforma elevatória p/ PCD	2,14m <sup>2</sup>
Sala bibliotecária	7,64m <sup>2</sup>
Biblioteca Acervo	198,01m <sup>2</sup>
Área de Leitura	113,65m <sup>2</sup>

**Tabela 02 – Dimensões Gerais dos Ambientes do Edifício Descritos na Planta do Projeto.**

**Fonte: Planta Baixa da Biblioteca / Auditório - Campus de Ananindeua (UFPA) – Anexos A e B (2022).**

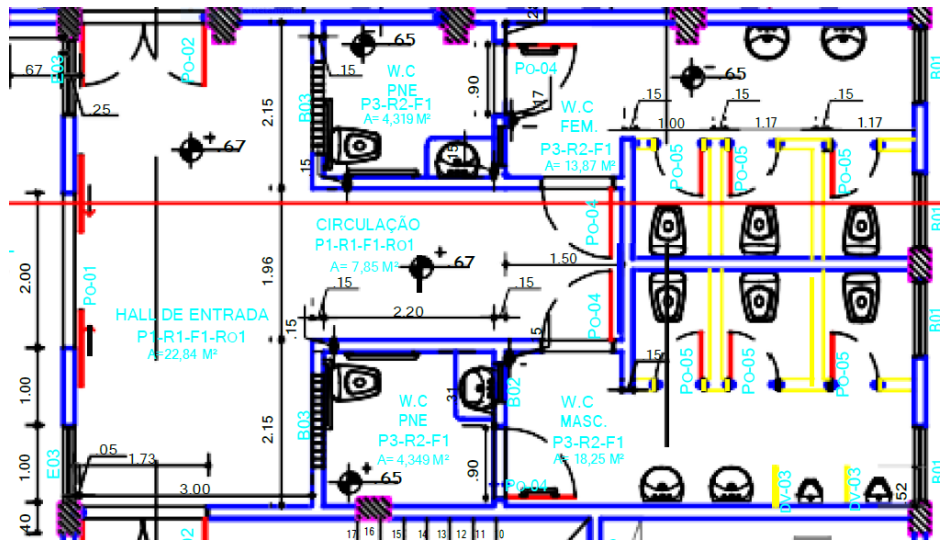


Figura 23 – (Planta Baixa) Hall de entrada, Circulação, Banheiro Masculino, Banheiro Masculino PNE, Banheiro Feminino, Banheiro Feminino PNE.

Fonte: Planta Baixa da Biblioteca / Auditório - Campus de Ananindeua (UFPA) – Anexos A e B (2022).

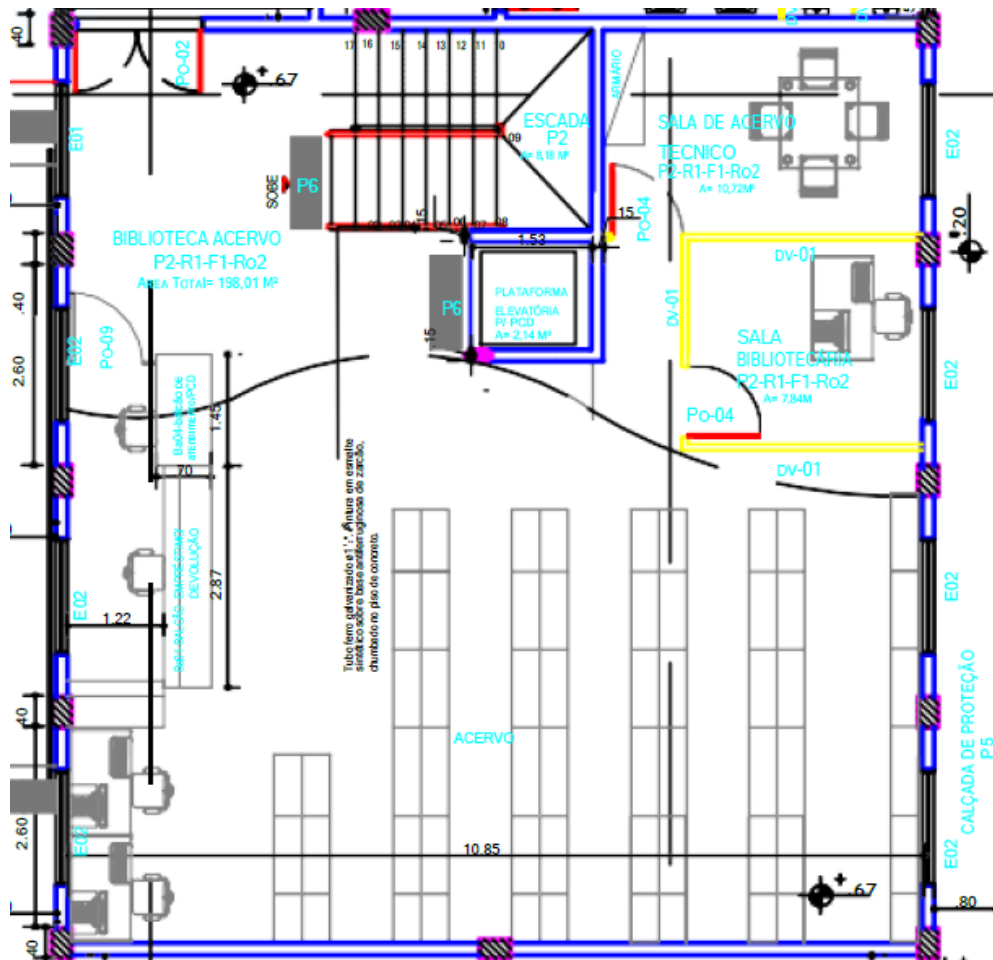


Figura 24 – (Planta Baixa) Escada, Sala de Acervo Técnico, Plataforma Elevatória P/ PCD, Sala Bibliotecária, Biblioteca Acervo, Área de Leitura.

Fonte: Planta Baixa da Biblioteca / Auditório - Campus de Ananindeua (UFPA) – Anexos A e B (2022).

### 3.3.4 Envoltória do Edifício

O projeto em questão possui uma lista dos elementos construtivos que serão utilizados, como mostra a Tabela 03, a seguir.

<b>PISOS</b>
P1 – Piso alta resistência tipo “KORODUR” – Granitina branca pigmentação concreto natural e resina acrílica.
P2 – Piso vinílico em placa 30x30cm, 3,2mm de espessura.
P3 – Piso cerâmico 40x40cm, “Tipo A”, PEI 4, na cor branco, assentamento na diagonal;
P5 – Cimentado liso com junta plástica. (Calçada) com pintura para piso na cor concreto;
P6 – Piso tátil discreetiv 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>BARRA BANHEIRO / P.C.D</b>
Barra de apoio em aço inoxidável – fabricante DECA ou similar. Dimensão: 0,90cm – linha PNE – DECA – Ref. 2310c.
OBS: Instalada de acordo com os parâmetros da NBR 9050. Chumbada na parede.
<b>PORTAS, ESQUADRIAS E BALANCINS</b>
Po-01 – Porta em vidro temperado 10mm incolor tipo de “correr”.
Po-02 – Porta em vidro temperado 100mm incolor com mola nas duas folhas. Dimensões: 1,73x2,10m e soleira de granito cinza claro.
Po-04 – Porta em “MDF” 10mm revestido com laminado tipo IPÊ. Dimensões: 0,90x2,10m e soleira em granito cinza claro.
Po-05 – Porta em alumínio natural nas dimensões 0,60x1,70m com fechadura tipo livre/ocupado.
E01 – Esquadria em alumínio natural e vidro liso 4mm tipo de correr. Dimensões: 1,50x1,10m.
E02 – Esquadria em alumínio natural e vidro liso 4mm tipo basculante. Dimensões: 1,50x0,60.
E03 – Esquadria em alumínio natural e vidro liso 6mm tipo de correr. Dimensões: 1,00x1,60m, peitoril em granito.
B02 – Balancins em alumínio natural e vidro liso 4mm tipo basculante. Dimensões: 0,50x0,60 / 1,70m, peitoril em granito.
B03 – Janela fechada com bloco de vidro transparente fixo (19x19x8cm), fabricante SEVES GLASS BLOCK-LIGHT DIRECTING. Dimensões do vão (120x0,70/1,70).

**Tabela 03 – Elementos Construtivos Listados na Planta do Projeto.**

**Fonte: Projeto Arquitetônico UFPA Campus Universitário de Ananindeua (2022).**

Para a envoltória do edifício, foram considerados os parâmetros dos elementos construtivos de acordo com as especificações do seu projeto. Os dados foram introduzidos na simulação por meio do *software OpenStudio v3.3.0*.

As Tabelas 4 e 5 a seguir mostram a lista de materiais do edifício e suas respectivas propriedades térmicas.

Material	Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/mK)	Densidade Equivalente (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/KgK)
Piso cerâmico	0,01	0,9	1600	920
Argamassa de assentamento	0,015	1,15	1600	1000
Argamassa de gesso	0,007	0,7	1200	840
Reboco de argamassa	0,025	1,15	1800	1000
Laje de concreto	0,2	1,75	2200	1000
Telha cerâmica	0,02	0,7	1000	920
Textura acrílica	0,010	0,4	1300	1000
Forro PVC	0,008	0,2	1200	-
Porta em MDF	0,025	0,2	850	2300
Porta em alumínio	0,05	230	2700	880
Janela de vidro	0,004 / 0,006	0,9	-	-
Bloco cerâmico	0,100	0,9	1300	920
Vidro comum	0,01	1,0	2500	840

**Tabela 04 – Propriedades Térmicas dos Materiais.**

**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.**

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

**Tabela 05 – Propriedades Térmicas dos Tipos de Vidro Utilizados.**

**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.**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com objetivo obter os resultados para análise foram realizadas duas diferentes simulações no *software EnergyPlus v9.6.0*. A primeira foi baseada nos parâmetros do edifício que são apresentados na Seção 3.4 para análise de conforto térmico. A segunda simulação foi em relação ao consumo energético (kWh) e representatividade (%) referente aos atuais equipamentos elétricos do edifício que são apresentados na Seção 3.4.2.

### 4.1 SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO

Na aba inicial do *software* são adicionados os arquivos climáticos da região, nesse caso foram inseridos arquivos de Belém do Pará no formato SWERA (BRA\_Belem-Val.de.Caes.821930\_SWERA), com dados da temperatura do ar, radiação solar, temperatura de bulbos secos e úmidos, entre outros. Para a simulação foram determinados alguns parâmetros: horário de funcionamento das 7h às 22h de segunda a sexta, no período letivo de acordo com o calendário acadêmico do ano de 2022.

Em seguida, são adicionados dados relacionados ao tipo de material e suas propriedades térmicas, para dessa forma poder montar o padrão construtivo da edificação de acordo com suas características dentro do simulador *OpenStudio v3.3.0* vinculado ao *EnergyPlus v9.6.0*. Após isso são adicionados os arquivos padrões de cada zona criada e especificada no *OpenStudio v3.3.0*, além de viabilizar modificações nas áreas de contatos que podem estar incorretas.

#### 4.1.1 Resultados da Simulação de Conforto Térmico.

A temperatura de bulbo úmido é a menor temperatura que pode ser produzida pela evaporação da água, é a quantidade de umidade no ar. É possível observar as temperaturas de bulbo úmido na Figura 25, com máximas e mínimas anuais entre 24°C e 25,5°C.

A temperatura de bulbo seco é a temperatura do ar em volta de cada indivíduo. Sua importância nos estudos de conforto térmico é para analisar a transferência de calor por convecção entre os indivíduos e as zonas térmicas, de acordo com a Figura 25, a temperatura está entre 24,8°C e 30,2°C.

A radiação solar direta, isto é, que está em contato direto com o solo, manifesta sua temperatura entre 21°C e 28,2°C, como mostra a Figura 25, se este parâmetro for introduzido

ao *software*, o contato direto com os elementos construtivos do prédio pode afetar diretamente na temperatura das zonas térmicas.

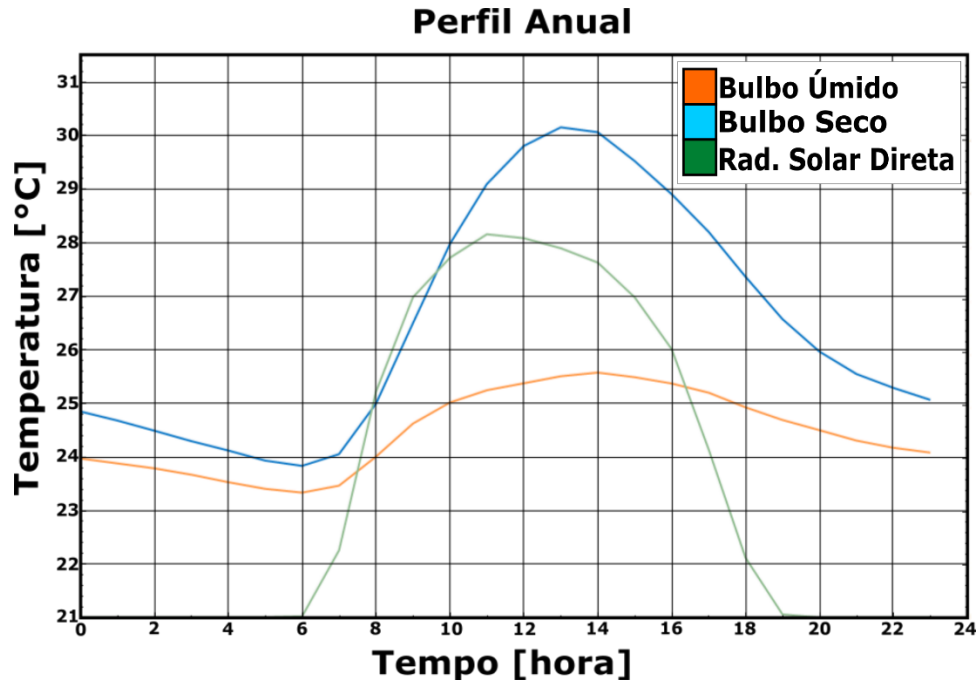


Figura 25 – Temperaturas: Bulbo Úmido, Bulbo Seco e Radiação Solar Direta.

Fonte: Autoria Própria.

Considerando os parâmetros utilizados na simulação, foram obtidos dados de comportamento da temperatura ao longo do ano letivo, a Figura 26 mostra esses dados para as seguintes zonas: *hall* de entrada e circulação, banheiro feminino, banheiro feminino PNE, banheiro masculino e banheiro masculino PNE, a Figura 27 mostra os mesmos dados para as zonas restantes, que são: biblioteca acervo, sala de acervo técnico e sala bibliotecária.

Dados estatísticos exibindo a média, desvio padrão, temperaturas máximas e mínimas diárias dos ambientes são mostrados na Tabela 06. As temperaturas no que se refere às horas de um ano são mostradas na Figura 28.

- Verde: zona térmica *hall* de entrada e circulação;
- Azul: zona térmica do banheiro feminino;
- Laranja: zona térmica do banheiro feminino PNE;
- Lilás: zona térmica do banheiro masculino;
- Amarelo: zona térmica do banheiro masculino PNE.

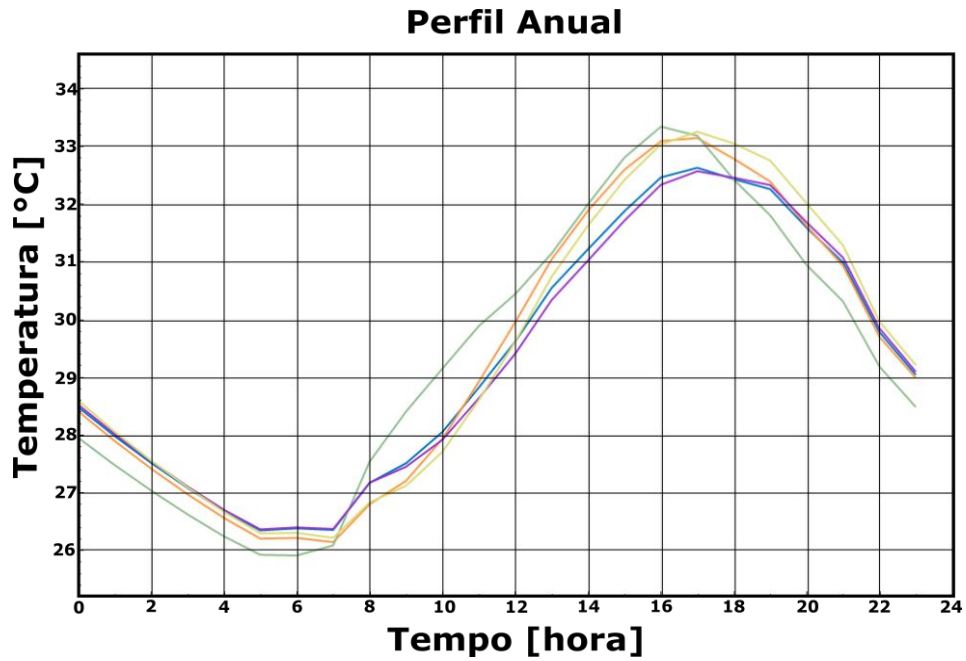


Figura 26 – Comportamento da Temperatura ao Longo do Ano Letivo para as Zonas: *Hall de Entrada e Circulação, Banheiro Feminino, Banheiro Feminino PNE, Banheiro Masculino, Banheiro Masculino PNE.*

Fonte: Autoria Própria.

- Verde: zona térmica da área de leitura;
- Azul: zona térmica da biblioteca acervo.

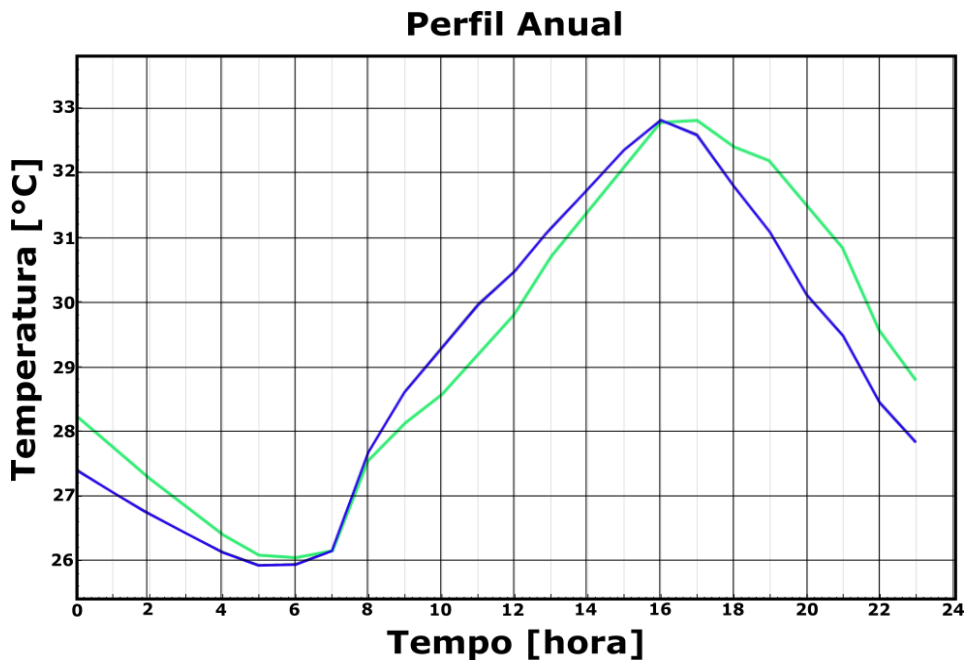


Figura 27 – Comportamento da Temperatura ao Longo do Ano Letivo para as Zonas: *Biblioteca Acervo e Área de Leitura.*

Fonte: Autoria Própria.

Pode-se reparar na Figura 26 que para a zona do *hall* de entrada e circulação até às 6h a temperatura fica dentro dos parâmetros de conforto térmico ideal que é entre 20°C e 26°C, a partir daí existe um salto de temperatura mostrando o período mais quente dia, chegando em 33,3°C para sua zona térmica. Para as zonas: banheiro masculino e banheiro feminino, as temperaturas chegam até 32,6°C e para as zonas: banheiro masculino PNE chegando em 33,2°C e banheiro feminino PNE chegando em 33,1°C. O pico de temperatura para as zonas fica entre às 16h e 17h, partindo daí a temperatura nos ambientes começa a ter uma queda até o retorno dos parâmetros de conforto térmico ideal.

Na Figura 27, também até às 6h a temperatura fica dentro dos parâmetros de conforto térmico ideal, partindo então de um aumento de temperatura mostrando que o período mais quente do dia chega em de 32,8°C para as zonas: biblioteca acervo e área de leitura, mantendo seu pico de temperatura entre 16h e 17h, a partir de então a temperatura nos ambientes começa a diminuir até o retorno dos parâmetros de conforto térmico.

Abaixo é mostrada a tabela com os dados estatísticos gerados a partir da simulação feita no *EnergyPlus v9.6.0*.

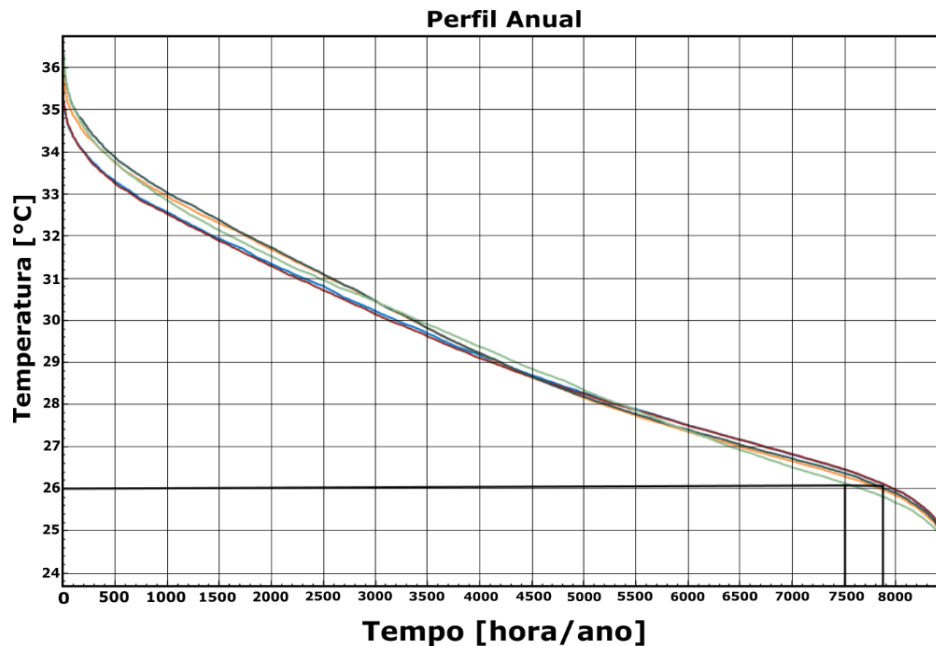
Temperatura do ar das zonas (°C)						
Zona Térmica	Méd.	Mín.	Máx.	Desvio Padrão	Temp. Mínima Diária	Temp. Máxima Diária
<b>Hall de entrada e circulação</b>	29,3461	23,7024	36,7598	2,6489	25,8371	33,3967
<b>Banheiro feminino</b>	29,2816	23,8875	35,4141	2,4105	26,2357	32,6901
<b>Banheiro feminino PNE</b>	29,3619	23,7969	36,3119	2,6383	26,0768	33,2089
<b>Banheiro masculino</b>	29,2496	23,8991	35,634	2,3942	26,252	32,6679
<b>Banheiro masculino PNE</b>	29,4125	23,8522	36,4651	2,6593	26,156	33,303
<b>Biblioteca acervo</b>	29,2176	23,9275	35,0953	2,3299	26,1951	32,4983
<b>Acervo técnico</b>	29,3524	23,8562	35,0756	2,4521	26,1654	32,5234
<b>Sala bibliotecária</b>	29,2756	23,7994	35,1342	2,8125	26,1842	32,5015
<b>Área de leitura</b>	29,0511	24,0122	35,8218	2,5198	25,8593	32,854

**Tabela 06 - Dados Estatísticos: Média, Desvio Padrão, Temperaturas Máximas e Mínimas Diárias dos Ambientes.**

**Fonte: Autoria Própria.**

A seguir, as Figuras 28 e 29 mostram as curvas de duração, onde mostra a média de temperaturas do ambiente em relação às horas de um ano:

- Verde-claro: *hall* de entrada e circulação;
- Azul: banheiro feminino;
- Laranja: banheiro feminino PNE;
- Marrom: banheiro masculino;
- Verde-escuro: banheiro masculino PNE.



**Figura 28 – Curva de Duração das Zonas: *Hall* de Entrada e Circulação, Banheiro Feminino, Banheiro Feminino PNE, Banheiro Masculino e Banheiro Masculino PNE.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Observa-se na Figura 28, a representação do ambiente de entrada e circulação, cerca de 7500 horas do ano a sua zona térmica está com a temperatura acima de 26°C, ou seja, estarão fora dos parâmetros de conforto térmico, representando aproximadamente de 88,3% do período anual e 1000 horas as zonas estarão dentro dos parâmetros de conforto térmico ideal entre 20°C e 26°C representando aproximadamente 11,7% do período anual. Ainda na Figura 28, a representação dos ambientes: banheiro feminino, banheiro feminino PNE, banheiro masculino e banheiro masculino PNE, pode-se observar um ponto médio de 7900 horas do ano a sua zona térmica está com a temperatura acima de 26°C, representando cerca de 93% do período anual e 600 horas as zonas estarão dentro dos parâmetros de conforto térmico ideal, representando cerca de 7% do período anual.



exatidão ao *EnergyPlus*, na obtenção de dados aplicados em cálculos de carga térmica com o *software*, essa diferença ocorre por conta das cargas internas (propriedades térmicas) dos elementos construtivos do edifício.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp. 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
Temp. 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
Temp. 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

**Tabela 07 – Dados Climatológicos Para Belém.**

**Fonte: Adaptado de CLIMATE-DATA.ORG (2022).**

#### 4.1.2 Melhorias Viáveis Para Maior Alcance do Conforto Térmico.

- Utilização de dispositivos de climatização, como por exemplo o ar condicionado, pois existe a possibilidade do controle de temperatura para o ambiente, mas esses dispositivos acarretam no aumento do consumo de energia elétrica.
- Melhoria na estrutura e elementos construtivos, por exemplo, uso de materiais com menores condutividades térmicas comparados aos atuais, como telhas, tijolos, acabamentos, etc. A elevação da estrutura viabiliza uma ventilação maior do local e renovação do ar constante.
- Proteção do contato direto da radiação solar: brises, cortinas e vegetação.
- Brises são materiais de uso externo, que impedem o contato direto da radiação solar antes que alcance a fachada e as aberturas, fazendo com que o calor ganho seja reduzido. Esse exemplo de barreira certifica um controle melhor dos ganhos térmicos, ventilação e iluminação natural (GUTIERRES; SILVA, 2016).
- Cortinas são boas escolhas para barramento interno, em função da maleabilidade de operação, podendo ser reguladas de acordo com a necessidade.

- Um item extremamente importante no quesito de minimizar o contato direto da radiação solar são as árvores. Um estudo feito na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP/ESALQ) em autoria do gestor ambiental Gustavo Torquato Oliva indica quantas árvores são necessárias para reduzir o calor excessivo em determinados ambientes. De acordo com a pesquisa, em Piracicaba, para reduzir 1°C na temperatura média urbana se faz necessário complementar 14,31% de cobertura arbórea em épocas secas e 27,70% em épocas de chuva.
- Influência das cores no conforto térmico. A pintura da construção pode influenciar diretamente no conforto térmico, isso acontece a partir da emissividade, absorvidade, transmissividade e refletividade das cores. Conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2014), às propriedades citadas estabelecem a eficiência térmica de um edifício com base nas cores usadas em sua pintura externa. Com intuito de alcançar uma melhor eficiência térmica, cores com o índice menor de absorvidade devem ser escolhidas, como diz a NBR 15220-2 (ABNT, 2005): a cor branca contém absorvância de 0,2, ao mesmo tempo que a preta possui índice 0,97.

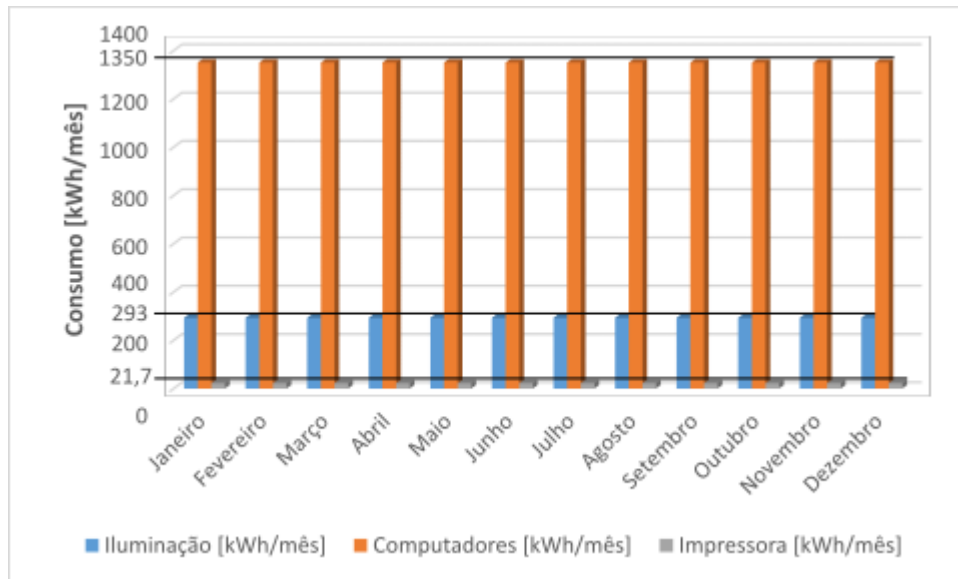
## 4.2 SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE CONSUMO ENERGÉTICO

Na aba inicial são configuradas as principais informações, dentre elas são os arquivos climáticos da região, arquivo SWERA (BRA\_Belem-Val.de.Caes.821930\_SWERA), para a simulação foram criados alguns parâmetros: agenda de utilização dos equipamentos elétricos, agenda da iluminação e horário de utilização de acordo com as atividades do campus. Após isso é configurada uma agenda do prédio, onde os parâmetros criados antes são adicionados juntos para um determinado ambiente.

Em seguida, feitas as configurações das cargas, nas definições de iluminação são informados os consumos individuais de cada lâmpada utilizada, com opções também de informar: consumo por espaço de área ( $W/m^2$ ), consumo por pessoa ( $W/pessoa$ ), fração radiante, fração visível e fração de ar de retorno, nas definições de equipamentos elétricos são informados os consumos dos computadores e da impressora, com opções de informar os dados: fração latente, fração radiante e fração perdida. Após isso, a zona térmica e os espaços do edifício são configurados juntamente com as cargas já estabelecidas, com o diferencial de que nesse momento são definidas as quantidades dos equipamentos: computadores, impressoras e lâmpadas.

#### 4.2.1 Resultados da Simulação de Consumo Energético.

Na Figura 30, pode-se ver que, o gráfico mostra o consumo de energia do sistema de iluminação chegando a 293 kWh/mês, a energia dos equipamentos elétricos: os computadores consumindo 1350 kWh/mês e a impressora consumindo 21,7 kWh/mês na zona térmica da biblioteca, no período do ano letivo e em horário integral de funcionamento: 7h às 22h.



**Figura 30 – Gráfico do Consumo [kWh/mês] do Sistema de Iluminação e dos Equipamentos Elétricos da Zona Térmica.**

**Fonte: Autoria Própria.**

A seguir na Tabela 08, são mostrados dados estatísticos gerados a partir da simulação feita no *EnergyPlus v9.6.0*. Dados médios, mínimos, máximos e desvio padrão referentes ao consumo do sistema de iluminação e equipamentos elétricos da zona térmica.

Energia de Iluminação (kWh/mês)				
Sistema	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
Iluminação	287,4375	264,6	292,95	8,1460
Energia Elétrica dos Equipamentos (kWh/mês)				
Equipamento	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
Computadores	1277,5	1176	1302	36,2043
Impressora	21,2916	19,6	21,7	0,6034

**Tabela 08 – Dados Estatísticos do Consumo do Sistema de Iluminação e Equipamentos Elétricos.**

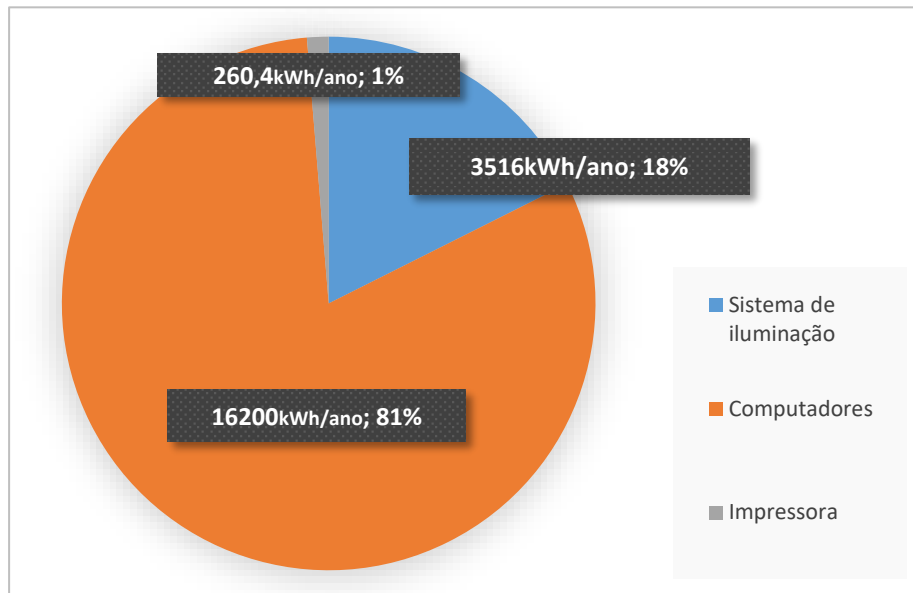
**Fonte: Autoria Própria.**

A tabela 09 e a Figura 33, apresentam o consumo em kWh anual por sistema e a representatividade de cada um em relação ao consumo total do edifício.

Sistema / Equipamentos	Consumo (kWh/ano)	Representatividade (%)
Iluminação	3.516	18
Computadores	16.200	81
Impressora	260,4	1
<b>Total</b>	<b>19.976,4</b>	<b>100</b>

**Tabela 09 – Consumo de Energia Anual.**

**Fonte: Autoria Própria.**



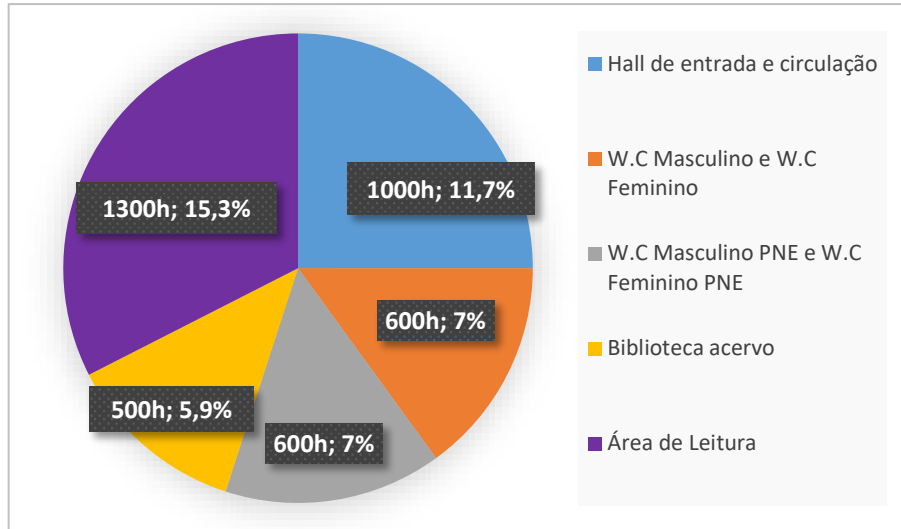
**Figura 31 - Mapa de Consumo Energético.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Observa-se que a proporção de consumo energético dos computadores representa a maior parte do consumo total do edifício, isso deve-se ao fato de que, o consumo de uma unidade de computador é equivalente a 76,7% do consumo total do sistema de iluminação, o edifício tem 6 unidades de computador, portanto tem um impacto significativo no consumo total e é um indicativo para ser feito um melhor dimensionamento do sistema de iluminação.

#### 4.3 RESUMO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

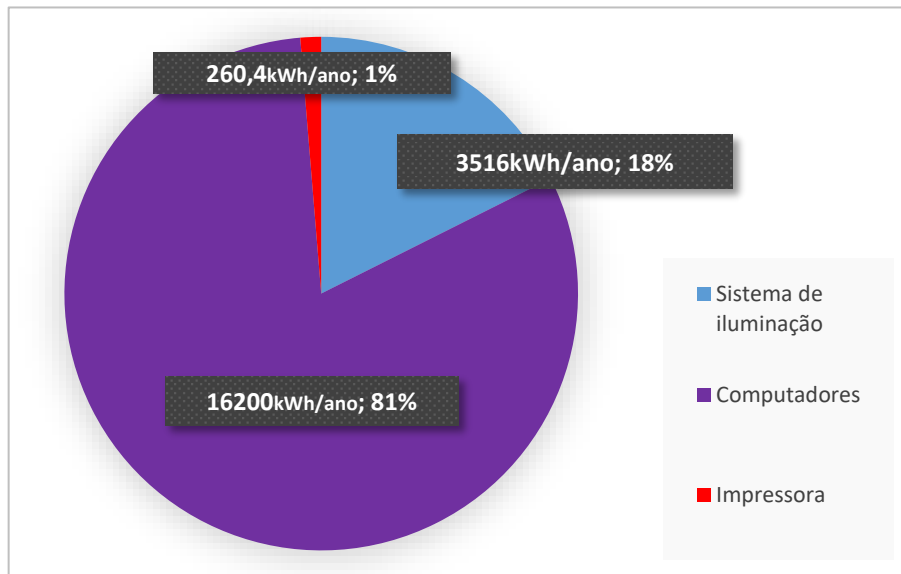
A quantidade de horas e representatividade anual dentro dos padrões de conforto térmico para os ambientes foram:



**Figura 32 – Resumo dos Resultados da Simulação de Conforto Térmico.**

**Fonte: Autoria Própria.**

O consumo em kWh/ano de cada sistema e suas respectivas representatividades em relação ao consumo total do edifício são:



**Figura 33 – Resumo dos Resultados da Simulação de Consumo Energético.**

**Fonte: Autoria Própria.**

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta utilizada para o cálculo das cargas desse edifício foi o *software EnergyPlus v9.6.0*, o qual emprega o método HBM para cálculo de carga térmica.

Este trabalho propôs mostrar a viabilidade da aplicação de *softwares* de simulação termoenergética, esse objetivo foi alcançado, já que foi possível demonstrar resultados obtidos (por meio de gráficos e tabelas), sobre o comportamento desempenho térmico e uma breve análise do consumo energético de uma edificação, os ambientes do edifício simulados pelo *EnergyPlus v9.6.0* apresentaram temperaturas entre 23,7°C e 33,3°C, com estes dados foi possível verificar a quantidade de horas e representatividade (%) anual em que os ambientes estão dentro dos padrões estabelecidos pela ISO 9241/2011 e da NR 17 em relação ao conforto térmico.

As características usadas para analisar as zonas térmicas definidas nos *softwares* foram os elementos construtivos descritos na planta do projeto, como tipos de materiais e medidas individuais, condutividade térmica e as variáveis térmicas externas presentes no arquivo climático da cidade. Dessa forma, foram obtidos os seguintes resultados: quantidade de horas e representatividade (%) anual dentro dos padrões térmicos de conforto para os ambientes.

Os dados utilizados no trabalho para fazer uma breve análise do consumo energético foram: quantidade de equipamentos, consumo por unidade, sistema de iluminação e agenda de utilização individual. Dessa forma pôde obter-se dados estatísticos gerados a partir da simulação, uma apresentação do consumo em kWh mensal e anual por sistema e a representatividade (%) de cada um em relação ao consumo total do edifício.

A partir disso, nota-se que a proporção de consumo energético dos computadores representa a maior parte do consumo total, por conta de que, o consumo de um único computador é equivalente a 76,7% do consumo total do sistema de iluminação.

Nota-se que a utilização de ferramentas como a simulação computacional colabora significativamente para o campo científico, empresarial e domiciliar, já que é possível analisar os elementos de qualquer edifício antes mesmo de ser construído, proporcionando análises práticas sobre desempenho térmico, energético e muitas outras variáveis disponíveis para coleta de dados.

Por fim, é válido afirmar que a utilização de *softwares* proporciona vantagens aos ocupantes da edificação, sendo essencial que esta seja uma alternativa, desde a fase de projeto, para melhorar o desempenho termoenergético e escapar de problemas futuros.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar simulações de outras edificações. Para o *Campus* Universitário de Ananindeua existem vários outros edifícios em projeto, como salas de aula, centro de arquivos, salas de controle e monitoramento, laboratórios e administrativo;
- Estender as capacidades do *software*, já que o *EnergyPlus* é um programa de código aberto, gratuito, e multiplataforma.
- Incluir novos formatos de visualização dos resultados e opção para conversão das unidades;
- Integrar com outros *softwares* ou comparação dos resultados obtidos de simulações partindo do uso de outros *softwares* de simulação termoenergética;
- Dimensionar um sistema de ar condicionado ideal do para os ambientes;
- Criar medidas de melhoria na eficiência energética e análises financeiras de viabilidade econômica da aplicação dessas medidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.220-2: Desempenho térmico de edificações.* Rio de Janeiro, p. 8. 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.520-2: Desempenho Térmico de Edificações.* (2008). Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.* (2005). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – SEF.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.* (2005). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – SEF.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575-1: Edificações Habitacionais — Desempenho.* 2013.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior.* (2013). UTFPR - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 8995-1: Norma de Iluminação de Ambientes.* 2013.
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** 2017 ASHRAE.
- ARANTES, Beatriz. **Conforto térmico em habitações de interesse social – Um estudo de caso.** 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2012.
- Arquitectura & Energía – Portal de eficiência energética y sostenibilidad en arquitectura y edificación.** Disponível em: < <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/>> Acesso em: 30 jun. 2021.
- ASHRAE 90.1-2019 (I-P).** Standard 90.1-2019 (I-P Edition) -- Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (ANSI Approved; IES Co-sponsored). 2019.
- ASHRAE, 1993, Handbook of Fundamentals. ASHRAE, New York.

- ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NR 17: Ergonomia – ENIT – MTE - informação e documentação. Portaria GM n.º 3.214, de 08 de junho de 1978.
- BELTRAM, Lucas. Simulação computacional do desempenho energético de uma edificação comercial. 2015.
- BEYER, P. *Apostila de Conforto Térmico*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.
- BRADSHAW, V., **The Building Environment: Active and Passive Control Systems**. 3 ed. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- ÇENGEL, YUNUS; GHAJAR, J. AFSHIN. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem Prática**. 4. Ed. – Porto Alegre: AMGH, 2012.
- CHUNG, T.M., TONG, W.C. **Thermal comfort study of young Chinese people in Hong Kong. Building and Environment**, v. 25. n. 4, p. 317-328, 1990.
- CLAPP, M. The Effect of Adverse Weather Conditions on Productivity on Five Building Sites. Building Trades Journal. H.S. (Litho) Ltd., 14 October, 1966.
- CLIMATE-DATA.ORG – **Clima Belém (Brasil)**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/para/belem-4299/>> Acesso em: 10 fev. 2022.
- 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.
- DOE – DEPARTMENT OF ENERGY – EnergyPlus. V7.0. 2015
- DOE - Department of Energy. (Outubro de 2008). *Energy Efficiency Trends in Residential and Commercial Buildings*. Edition ed.).
- Eletrobras, P. *Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa Setor Comercial*. 2007.
- ENERGYPLUS, **Energyplus Energy Reference: The Reference to Energyplus Calculations**, 2013.
- ENERGYPLUS, **Energyplus Energy Reference: The Reference to Energyplus control volume of heat balance on external surfaces**, 2021.
- EPA, **What is a Green Building**. Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, 2012.
- EPA, **What is a Green Building**. Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, 2012.
- FANGER, P.O., “**Thermal Cpmfort**”, McGraw-Hill, New York. 1970.

FERNANDES, Ana Eliza Pereira. As torres envidraçadas e o consumo energético. **II Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano de Edificações e Comunidades Sustentáveis**, p. 315-322, 2001.

França, F. (s.d.). *Controle Térmico de Ambiente*. Disponível em: <[http://www.fem.unicamp.br/~em672/Ciclo\\_Refrigeracao\\_Refrigerantes.doc](http://www.fem.unicamp.br/~em672/Ciclo_Refrigeracao_Refrigerantes.doc)> Acesso em: 10 nov. 2021.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. Manual de conforto térmico. São Paulo: Studio Nobel, 2007.

GUTIERREZ, G. C. R.; SILVA, J. S. **Brises controlam a incidência de luz e garantem conforto térmico à edificação**. 2016.

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

IEA – **Energy Efficiency**. Disponível em: <<https://www.iea.org/>> Acesso em: 11 nov. 2021.

IEMA/ES – INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Prova de concurso para analista de meio ambiente – Área: engenharia mecânica**. 2007.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th

INCROPERA, Frank P.; DeWITT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7<sup>th</sup> Edition ed.).

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

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. 366 p.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. **Eficiência energética na arquitetura**. Pro-Livros, 2004.

- LBNL, **Getting Started With EnergyPlus**. US Department of Energy, Version 5.0, USA, 2010.
- Leite, B. *Simulação Computacional de Desempenho Energético de Edifícios: Propriedades Térmicas*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil. 2016.
- LOPES, Cícero Furtado de Mendonça. **Análise comparativa de carga térmica entre dois métodos de cálculos para um auditório**. 2013. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- MARTINEZ, Maria Fernanda et al. Redução de consumo de energia elétrica através de conceitos green building. **Eletrônica de Potência**, v. 14, n. 2, p. 141-148, 2009.
- Martins, M.P. de S, 1999 “**Inovação Tecnológica e Eficiência Energética**”. MBA em Energia Elétrica, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MAZZAFERRO, Leonardo; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto ground domain no programa Energyplus. **Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética de Edificações do Departamento de Engenharia Civil da UFSC**, 2015.
- 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.
- MCQUISTON, Faye C.; PARKER, Jerald D.; SPITLER, Jeffrey D. Heating. **Ventilating and Air conditioning: Design and analysis, 6th edition, John Wily, NY**, 2005.
- Mendes, N. e. (2005). Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. *Ambiente construído* 5.4.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil**. *Ambiente Construído*. Porto Alegre. V.5,n.4. p 47-68, 2005.
- MENDES, Nathan et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.
- MMA. *Curso para o Setor Público: Etiquetagem de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (Etiqueta PBE Edifica)*. Ministério do Meio Ambiente. 2011.
- MÜLLER, Rafael Walter. Estudo da eficiência energética e conforto térmico de um prédio universitário via simulação com o EnergyPlus. 2013.
- Nobre, J. C. de A., Sousa, D. L. P. de, Ribeiro, F. dos S. ., & Andrade, L. C. F. (2022). Simulação Computacional Sobre Desempenho Térmico em uma Residência Conjunta

Localizada em Ananindeua-PA. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 8(5), 14118–01e. <https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss5pp14118-01e>.

OLIVA, Gustavo Torquatro. **Relação do conforto humano com métricas de cobertura arbórea**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Ordenes, M., & Lamberts, R. (2008). *Transferência de Calor na Envolvente da Edificação*. Florianópolis: Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina.

PEDERSEN, C.O., FISHER, D.E., LIESEN, R.J., “Development of a Heat Balance Procedure for Calculating Cooling Loads”, **ASHRAE Transactions**, v. 103, n. 2, p. 459-468, 1997.

PIETZSCH, Diego de Ávila. Dimensionamento de um sistema ar condicionado e análise energética para um prédio. 2012.

PIMENTA, Ana Isabela, OLIVEIRA, Beatriz, CAMPOS, Joana, NETO, Maria João, PEREIRA, Rafaela. **Conceito de conforto térmico humano**. Relatório - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.

PROCEL. *Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial*. Rio de Janeiro: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 2005.

PROCEL. *Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial*. Rio de Janeiro: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 2005.

PROCEL. *Manual Prático de Ar Condicionado*. Rio de Janeiro. 2011.

**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.

RAFFNSØE, L. M. Thermal Performance of Air Flow Windows—Master thesis. **Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering**, 2007.

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

RUPP, Ricardo Forgiarini et al. Dimensionamento de área de janela em edificações comerciais: integração da iluminação natural com a artificial e utilização da ventilação híbrida. 2011.

SANTOS, R. L.; ANDRADE, H. O. **Avaliação quantitativa do conforto térmico de uma cidade em área de transição climática**: Feira de Santana-Bahia, Brasil. *Revista de Geografia Norte Grande*, n. 40, p. 77-84, 2008.

SIEGEL, R.; HOWELL, J.R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 4th edition, Taylor & Francis, New York – London, 2002.

SIQUEIRA, Eduardo Marocco de. Projeto do envoltório de um prédio com energia líquida zero (PELZ). 2011.

SOLA, Antonio Vanderley Herrero; KOVALESKI, João Luiz. Eficiência energética nas indústrias: cenários & oportunidades. **Encontro Nacional de Engenharia da Produção (ENEGERP)**, v. 14, p. 1-8, 2004.

Sousa, D. L. P. de, Nobre, J. C. de A., & Andrade, L. C. F. (2022). Análise Térmica de Bases de Dados Climáticos da Cidade de Belém-PA. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 8(3), 14208–01e. <https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss3pp14208-01e>.

SOUSA, D. L. P.; NOBRE, J. C. A. ; RIBEIRO, F. S. . Amazônia Oriental: Estudo de Caso sobre Conforto Térmico de uma Residência Padrão Localizada em Belém do Pará. In: CTDA 2021 - IV CONGRESSO DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA, 2021, Online. Anais do IV Congresso de Tecnologia e Desenvolvimento da Amazônia. MARABÁ-PA: UNIFESSPA, 2021. v. IV. p. 109-116.

SPITLER, Jeffrey D.; FISHER, Daniel E.; PEDERSEN, Curtis O. **The radiant time series cooling load calculation procedure**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), 1997.

STRAND, R. K. et al. “**Modularization and simulation techniques for heat balance based energy and load calculation programs: the experience of the ASHRAE Loads Toolkit and Energyplus**”. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, August 13-15, pp. 43-50, 2001.

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

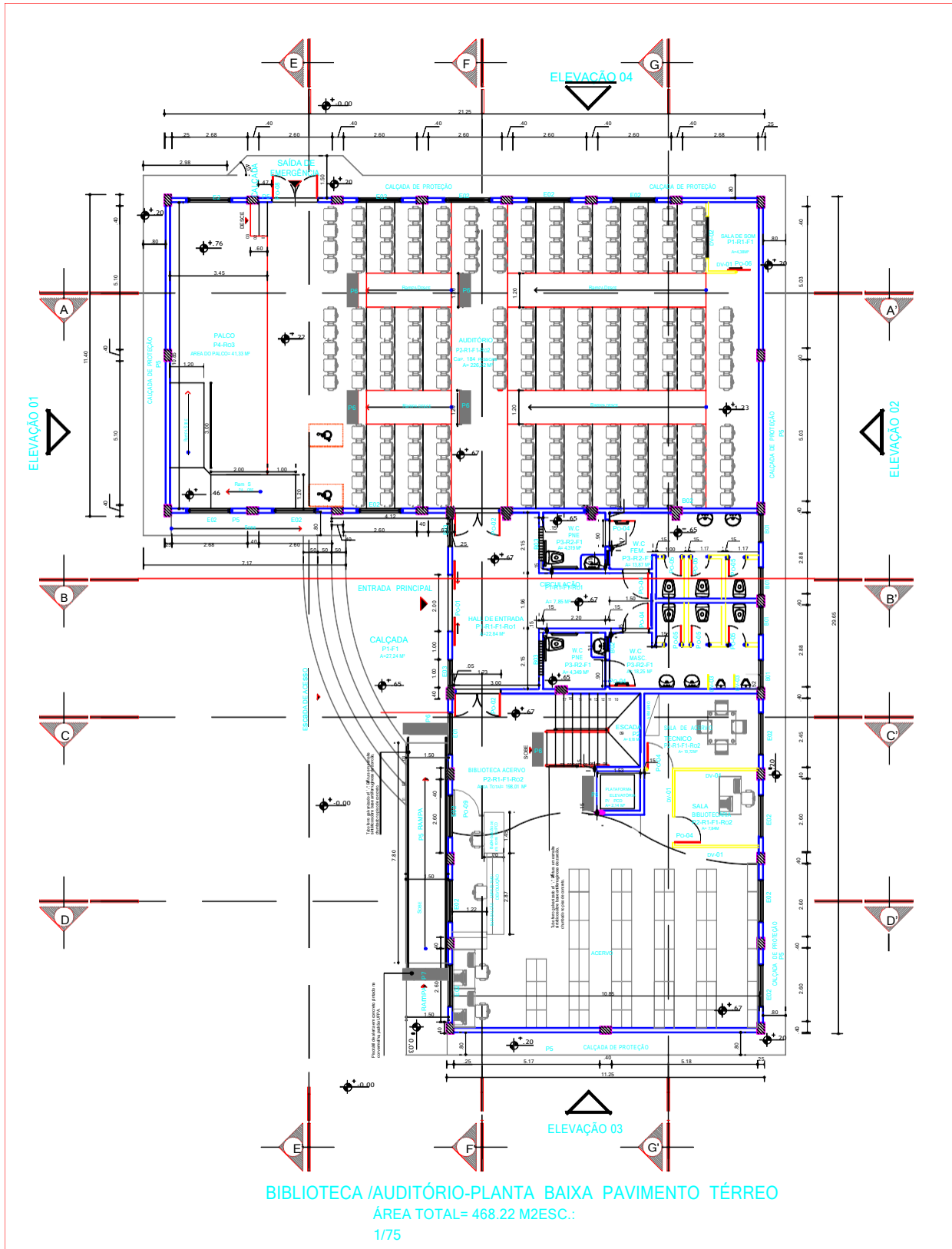
TORRES, Rafael Gerzson. Projeto de um prédio de energia líquida zero (PELZ) com foco nos sistemas. 2011.

Ugreen - Green Buildings e sua Relação com a Sustentabilidade. Disponível em: <https://www.ugreen.com.br/green-building/>. Acesso em: 04 mai 2022.

USDOE, EnergyPlus Energy Simulation Software. Departamento de Energia dos Estados Unidos. Disponível em: <https://www.energy.gov/search/site?keywords=Energy+Simulation+Software>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

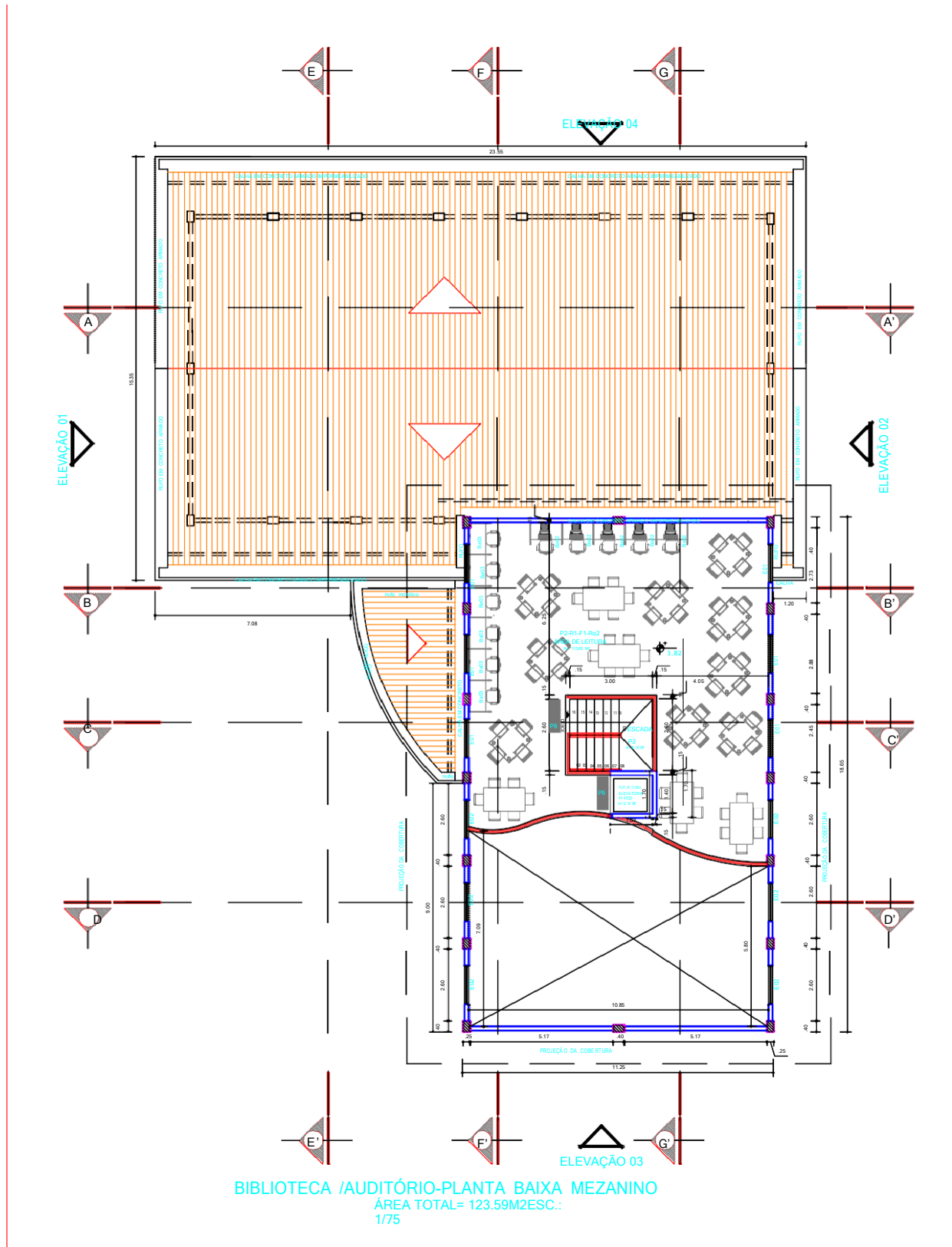
VELOSO, Maísa; ELALI, Gleice Azambuja. Uma Avaliação da Eficiência Energética em Edificações Hoteleiras em Natal/RN. 2004.

**ANEXO A – BIBLIOTECA / AUDITÓRIO – PLANTA BAIXA TÉRREO.**



Fonte: Projeto Arquitetônico – Planta Baixa Biblioteca / Auditório – *Campus* de Ananindeua (UFPA). Autor: Arquiteto Celio Otávio Pereira da Silva. CAU Nº A 16660-0 CAU/PARÁ.

## ANEXO B – BIBLIOTECA / AUDITÓRIO – PLANTA BAIXA MEZANINO.



Fonte: Projeto Arquitetônico – Planta Baixa Biblioteca / Auditório – *Campus* de Ananindeua (UFPA). Autor: Arquiteto Celio Otávio Pereira da Silva. CAU Nº A 16660-0 CAU/PARÁ.