



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**MATHEUS OLIVEIRA SILVA**

**DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE UM SISTEMA DE  
VENTILAÇÃO PARA UM TRANSFORMADOR A ÓLEO EM UMA  
SUBESTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA**

**OURO PRETO - MG  
2021**

**MATHEUS OLIVEIRA SILVA**  
**matheus.silva3@ufop.aluno.edu.br**

**DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE UM SISTEMA DE  
VENTILAÇÃO PARA UM TRANSFORMADOR A ÓLEO EM UMA  
SUBESTAÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Ouro Preto  
como requisito para a obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** DSc. Luís Antônio Bortolaia

**OURO PRETO – MG**  
**2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586d Silva, Matheus Oliveira .

Dimensionamento e seleção de um sistema de ventilação para um transformador a óleo em uma subestação de uma usina solar fotovoltaica. [manuscrito] / Matheus Oliveira Silva. - 2021.  
85 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Engenharia mecânica -Transformador. 2. Energia solar - Carga térmica. 3. Engenharia mecânica - Ventilação. 4. Engenharia mecânica - Ventiladores. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Matheus Oliveira Silva**

### **Dimensionamento e seleção de um sistema de ventilação para um transformador a óleo em uma subestação de uma usina solar fotovoltaica**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 22 de Abril de 2021

#### Membros da banca

DsC. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DsC. Elisângela Martins Leal (Universidade Federal de Ouro Preto)  
DsC. Claudio Marcio Santana (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/04/2021



Documento assinado eletronicamente por **Luís Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/04/2021, às 13:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0163138** e o código CRC **92F48342**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.003767/2021-11

SEI nº 0163138

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

Dedico aos meus pais, pelo apoio, a mais  
uma etapa concluída.

## **AGRADECIMENTO**

Aos meus pais, pela oportunidade e apoio em realizar uma graduação de ensino superior.

Ao meu irmão, pelo apoio nos estudos e na vida.

A Jéssica, pelo companheirismo, tornando a caminhada da universidade mais fácil.

Ao orientador, Luís Antônio Bortolaia, pela dedicação e apoio na realização desse trabalho e nas disciplinas do curso.

Aos professores do curso de engenharia mecânica que compartilharam conhecimento engrandecendo minha formação.

*“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,  
nunca tem medo e nunca se arrepende”.*

Leonardo da Vinci

## RESUMO

SILVA, Matheus Oliveira: **Dimensionamento e seleção de um sistema de ventilação para um transformador a óleo em uma subestação de uma usina solar fotovoltaica**, 2021 (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

O presente tem o objetivo de dimensionar e selecionar um sistema de ventilação que garanta uma vazão de ar, afim de manter o ambiente com uma temperatura admissível, que possa garantir uma expectativa de vida, adequada do transformador, que é em torno dos 30 anos. As cargas térmicas geradas no ambiente fazem com que a temperatura interna fique elevada, aumentando a temperatura do transformador proporcionando um desgaste no material isolante, ocasionando perda de vida útil. Os posicionamentos das aberturas, ou ventiladores, nos ambientes, são importantes para garantir um fluxo de ar nos geradores de calor, e também assegurar uma temperatura mais adequada nos equipamentos. Com isso, nesse estudo, são abordados o consumo de energia elétrica, o qual faz com que o uso de equipamentos de transformação seja mais utilizado; os transformadores, seus tipos e suas limitações em relação a temperatura ambiente; a ventilação, conseqüentemente a carga térmica envolvida. Sendo assim, o presente estudo engloba: (i) a apresentação do problema, determinação dos objetivos, revisão bibliográfica, para ajudar na solução do problema estudado, metodologia adotada na captação de dados e apresentação dos resultados, (ii) apresentação dos dados relativos a subestação e a cidade que ela é instalada, como características térmicas das superfícies e temperaturas do local, (iii) cálculo das cargas térmicas envolvidas e da vazão do ar necessária para ter uma temperatura adequada, (iv) determinação do ventilador a ser usado e o seu posicionamento na subestação. Com a metodologia, obtém-se um sistema adequado para garantir uma temperatura ambiente visando uma maior vida útil do transformador. Para o estudo de caso, presente no trabalho, um sistema de ventilação foi dimensionado, para uma subestação que contém um transformador de 1000 kVA de potência e inversores de frequência de uma usina solar. O sistema insere no ambiente 17100 m<sup>3</sup>/h, e com posições adequadas dos ventiladores, garante uma temperatura média inferior a 30 °C e a máxima inferior a 40°C, permitindo temperaturas de operação do transformador em valores adequados sem deterioração excessiva dos isolantes, não permitindo perda de vida útil fora do comum.

**Palavras-chave:** *Transformador, expectativa de vida, carga térmica, ventilação, ventiladores, posicionamento.*



## ABSTRACT

*The present has the objective of sizing and selecting a ventilation system that guarantees an air flow, in order to maintain the environment with an acceptable temperature, which can guarantee an adequate life expectancy of the transformer, which is around 30 years. The thermal loads generated in the environment cause the internal temperature to become high, increasing the temperature of the transformer, causing a wear on the insulating material, causing loss of useful life. The positioning of the openings, or fans, in the environments, are important to ensure an air flow in the heat generators, and also to ensure a more adequate temperature in the equipment. With this, in this study, the consumption of electric energy is approached, which makes the use of transformation equipment more used; transformers, their types and their limitations in relation to ambient temperature; ventilation, consequently the thermal load involved. Therefore, the present study includes: (i) the presentation of the problem, determination of the objectives, bibliographic review, to help in the solution of the studied problem, methodology adopted in the capture of data and presentation of the results, (ii) presentation of the data related to substation and the city in which it is installed, such as thermal characteristics of the surfaces and temperatures of the location, (iii) calculation of the thermal loads involved and the air flow required to have an adequate temperature, (iv) determination of the fan to be used and the positioning in the substation. With the methodology, an adequate system is obtained to guarantee an ambient temperature aiming at a longer life of the transformer. For the case study, present in the work, a ventilation system was designed for a substation that contains a 1000 kVA power transformer and frequency inverters for a solar plant. The system inserts in the environment 17100 m<sup>3</sup> / h, and with adequate positions of the fans, it guarantees an average temperature below 30 °C and the maximum below 40°C, allowing operating temperatures of the transformer in adequate values without excessive deterioration of the insulators, not allowing loss of unusual service life.*

**Keywords:** *Transformer, life expectancy, thermal load, ventilation, fans, positioning.*

## LISTA DE SIMBOLOS

IEA	Agência Internacional de Energia	
CC	Corrente continua	
CA	Corrente alternada	
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	
MME	Ministério de Minas e Energia	
BEN	Balanco Energético Nacional	
V	Volts	
W	Watt	
K	Kelvin	
$\dot{Q}_{cond}$	Taxa de condução de calor	W
k	Condutividade térmica do material	W/m.K
$T_1$ e $T_2$	Temperaturas superficiais do corpo	K
$\Delta x$	Espessura da camada	m
A	área	m <sup>2</sup>
$\dot{Q}_{conv}$	Taxa de transferência de calor por convecção	W
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m <sup>2</sup> .K
$A_s$	Área superficial	m <sup>2</sup>
$T_s$	Temperatura da superfície	K
$T_\infty$	Temperatura do fluido	K
$\dot{Q}_{max}$	Taxa máxima de radiação emitida	W
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
$Q_e$	Vazão de ar necessária	m <sup>3</sup> /s
$\dot{q}_T$	Carga térmica total	W
$\rho_e$	Massa específica do ar externo	kg/m <sup>3</sup>
$T_e$	Temperatura do ar externo	°C

$\Delta T$	Aumento de temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
$\dot{q}_i$	Geração interna de calor	W
$\dot{q}_e$	Quantidade de calor	W
$c_p$	Calor específico	J/(kg. $^{\circ}\text{C}$ )
$P_{eixo}$	Potência no eixo	W
Q	Vazão	m <sup>3</sup> /s
PTV	Pressão total do ventilador	Pa
PEV	Pressão estática do ventilador	Pa
$\eta_t$	Eficiência total do ventilador	-
$\eta_{te}$	Eficiência estática do ventilador	-
$C_p$	Carga térmica devido a condução	W
U	Transmitância térmica	W/m <sup>2</sup> .K
$\theta_e - \theta_i$	Diferença entre a temperatura externa e interna	K
$\phi$	Ganho de calor	W
$\theta_i$	Temperatura interna	K
U	Transmitância térmica	W/m <sup>2</sup> .K
$R_{se}$	Resistência superficial externa	(m <sup>2</sup> .K)/W
RS	Radiação solar	W/m <sup>2</sup>
R	Resistência térmica	W/m <sup>2</sup> . $^{\circ}\text{C}$
e	Espessura	m
$\lambda$	Condutividade térmica	W/m <sup>2</sup> . $^{\circ}\text{C}$
$\eta$	Rendimento do equipamento	-
P	Potência aplicada no equipamento	W

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Consumo final total por fonte, Mundo 1990-2018.....	5
Figura 2 – Consumo de eletricidade, Mundo 1990-2018 .....	6
Figura 3 – Demanda global de eletricidade por região no Cenário de Políticas Declaradas, 2000-2040 .....	6
Figura 4 - Matriz energética mundial 2018 .....	7
Figura 5 - Matriz Elétrica Mundial 2018.....	8
Figura 6 - Matriz Elétrica Brasileira 2019.....	8
Figura 7 - Consumo em GWh de energia elétrica anual no Brasil .....	9
Figura 8 - Representação esquemática - célula, módulo e arranjo fotovoltaico.....	10
Figura 9 - Diagrama esquemático de uma central fotovoltaica.....	11
Figura 10 - Usina solar de Tauá.....	11
Figura 11 - Transformador regulador na Usina de Itaipu.....	14
Figura 12 - Transformador em poste .....	15
Figura 13 - Construção de transformador do tipo núcleo envolvido.....	16
Figura 14 - Construção de transformador do tipo núcleo envolvente .....	17
Figura 15 - Transformador Trifásico .....	18
Figura 16 - Partes componentes de um transformador a óleo mineral .....	19
Figura 17 - Sistema de isolamento híbrida.....	21
Figura 18 - Perfil de carregamento do transformador .....	25
Figura 19 - Posicionamento de aberturas para ventilação do transformador em cubículos .....	27
Figura 20 - Condução através de um sólido ou fluido estacionário .....	29
Figura 21 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento .....	30
Figura 22 - Troca líquida de calor por radiação entre duas superfícies.....	32
Figura 23 - Edifício com temperatura interna maior que a temperatura externa.....	33
Figura 24 - Localização da entrada e saída do ar de ventilação (vista superior).....	34
Figura 25 - Localização da entrada e saída do ar de ventilação (vista lateral).....	34

Figura 26 - Ventilação local e ventilação geral .....	35
Figura 27 - VGD para remoção de calor sensível .....	37
Figura 28 - Insuflação mecânica e exaustão natural.....	39
Figura 29 - Insuflação natural e exaustão mecânica.....	40
Figura 30 - Insuflação e exaustão mecânicas .....	40
Figura 31 - Indicação quanto à localização dos ventiladores, para ventilação diluidora .....	42
Figura 32 - Ventilador axial e centrifugo .....	42
Figura 33 - (a) axial propulsor, (b) axial comum e (c) turbo-axial.....	43
Figura 34 - (c) Centrifugo de pás para trás, (b) centrifugo de pás radiais e (c) centrifugo de pás para frente.....	44
Figura 35 - Materiais e sua condutividade térmica ( $\lambda$ ), densidade específica ( $\rho$ ) e calor específico (c).....	50
Figura 36 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa .....	54
Figura 37 - Desenho da subestação (a) vista isométrica e (b) vista superior.....	57
Figura 38 - Potência aplicada devido as placas solares .....	58
Figura 39 - Transformador Óleo 1000.0kVA 13.8/0.22kV CST ONAN .....	58
Figura 40 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para Belo Horizonte .....	59
Figura 41 - <i>Software</i> Radasol .....	60
Figura 42 - Inserção de dados no <i>software</i> Radasol.....	60
Figura 43 - Dados meteorológicos de 1931 até 2020 para a cidade de Belo Horizonte.....	61
Figura 44 - Temperatura em °C por hora do dia 16 de fevereiro dos anos de 2011 a 2021 .....	62
Figura 45 - Carga térmica total em W da subestação .....	70
Figura 46 - Gráfico da vazão de ar necessária para a subestação em cada hora do dia.....	71
Figura 47 - Interface do software Vortex .....	75
Figura 48 - Software Vortex, seleção do ventilador a 1750 RPM.....	75
Figura 49 - Curva do ventilador AVR-RL 630/22 Classe I.....	76
Figura 50 - Ventilador AVR-AL 630/22 .....	76

Figura 51 - Motor WEG 3 CV e 4 polos .....	77
Figura 52 - Subestação com os locais de instalação dos ventiladores.....	78

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Limites máximos de temperatura para sistemas de isolamento.....	23
Tabela 2 - Resistência térmica superficial interna e externa .....	47
Tabela 3 - Absortividade ( $\alpha$ ) (ondas curtas) e emissividade ( $\varepsilon$ ) para alguns tipos de superfície .....	48
Tabela 4 - Tabela de indicadores e variáveis.....	55
Tabela 5 - Radiação solar em W/m <sup>2</sup> por hora no dia 16 de fevereiro em Belo Horizonte .....	61
Tabela 6 - Valores de transmitância térmica de blocos .....	63
Tabela 7 - Transmitância térmica de lajes .....	63
Tabela 8 - Carga térmica dos inversores .....	64
Tabela 9 - Rendimento do transformador WEG 1000kVA.....	64
Tabela 10 - Carga térmica do transformador.....	65
Tabela 11 - Condutividade térmica dos materiais que compõem o portão .....	66
Tabela 12 – Orientação, área e propriedades das paredes, teto e portão .....	67
Tabela 13 - Equações do fluxo na superfície vindo da irradiação solar.....	67
Tabela 14 - Fluxo de calor nas paredes devido a irradiação solar em W .....	68
Tabela 15 - Carga térmica total no ambiente em W .....	69
Tabela 16 - Temperatura interna obtida com a vazão de ar calculada .....	73

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral .....	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Energia elétrica .....	5
2.1.1	Matriz energética .....	7
2.1.2	Utilização de Energia Elétrica .....	9
2.1.3	Energia solar fotovoltaica.....	10
2.1.4	Distribuição de energia elétrica .....	12
2.1.5	Necessidade do uso dos transformadores .....	12
2.2	Transformadores .....	13
2.2.1	Princípios de funcionamento .....	15
2.2.2	Tipos de Transformadores .....	16
2.2.3	Características elétricas e térmicas .....	17
2.2.4	Características quanto ao meio isolante.....	19
2.2.5	Isolantes .....	20
2.2.6	Perdas .....	21
2.2.7	Expectativa de vida do transformador .....	22
2.2.8	O efeito da temperatura ambiente no sobre-carregamento dos transformadores	24
2.2.9	Geração de calor do transformador .....	25
2.2.10	Refrigeração dos transformadores .....	26
2.2.11	Ventilação em locais de instalação dos transformadores .....	26
2.3	Transferência de calor .....	28
2.3.1	Condução .....	28
2.3.2	Convecção .....	29
2.3.3	Radiação .....	31
2.4	Ventilação .....	32
2.4.1	Definição .....	32
2.4.2	Tipos de ventilação.....	35



2.4.3	Ventilação exaustora.....	35
2.4.4	Ventilação geral ou insufladora.....	36
2.4.5	Ventilação geral diluidora (VGD) para remoção de calor sensível.....	37
2.4.6	Ventilação mecânica (forçada) .....	38
2.4.7	Ventiladores.....	41
2.4.8	Ventiladores axiais .....	43
2.4.9	Ventiladores centrífugos.....	44
2.4.10	Grandezas características do ventilador .....	44
2.5	Carga térmica.....	45
2.5.1	Carga térmica devido a insolação.....	46
2.5.2	Carga térmica devido a equipamentos.....	50
2.6	Considerações finais do capítulo .....	51
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>52</b>
3.1	Tipo de pesquisa .....	52
3.2	Materiais e Métodos .....	53
3.3	Instrumento de coleta de dados .....	55
3.4	Variáveis e indicadores.....	55
3.5	Tabulação de dados .....	56
3.6	Considerações finais .....	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
4.1	Estudo de caso .....	57
4.1.1	Características da cidade .....	59
4.1.2	Características construtivas da subestação .....	62
4.2	Cálculo da carga térmica .....	63
4.2.1	Inversores .....	63
4.2.2	Transformador .....	64
4.2.3	Irradiação solar .....	65
4.2.4	Total.....	68
4.3	Vazão de ar .....	70
4.4	Validação da quantidade de ar necessária .....	72
4.5	Seleção de ventilador.....	74
4.6	Local de instalação do ventilador .....	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>79</b>

5.1	Conclusões.....	79
5.2	Recomendações .....	81
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>		<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do Problema

Ao longo dos anos a busca por aumento da eficiência nos processos é cada vez mais procurada. Conseguir fazer com que os equipamentos tenham uma vida útil e disponibilidade adequada é sempre interessante para se reduzir custo e conseguir produções maiores (CHAPMAN, 2013).

O setor de produção de energia elétrica é um setor que também busca a utilização dos equipamentos de produção e distribuição de energia de forma otimizada. Como os equipamentos da produção de energia elétrica tem alto valor agregado, busca-se manter condições de operação favoráveis para a operação desses equipamentos, possibilitando uma expectativa de vida conveniente (MAMEDE FILHO, 2013).

A cada ano que passa utiliza-se cada vez mais a energia elétrica, seja em residências ou em processos industriais. Como se trata de necessidades distintas em vários locais, as tensões utilizadas também são diferentes. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020a), o consumo de energia elétrica no mundo foi de 24738,9 TWh (terawatt-hora) no ano de 2018. A utilização da energia solar fotovoltaica vem ganhando espaço no setor de energia elétrica. O consumo de energia elétrica vem aumentando ano após ano.

Em relação a essas diferentes exigências, a utilização de transformadores é amplamente empregada em diversos setores que utilizam energia elétrica de corrente alternada (CA).

“Um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão” (CHAPMAN, 2013, p. 66).

Equipamentos em geral apresentam uma expectativa de vida e algum tipo de perda em seus rendimentos de acordo com a forma de operação, e não é diferente no caso dos transformadores. As perdas, geralmente, são transformadas em calor dissipado pelo dispositivo.

A carga térmica gerada pelo equipamento, mais as cargas térmicas vindo do ambiente onde esses transformadores se encontram, podem fazer com que esse equipamento atinja temperaturas elevadas, influenciando negativamente na sua eficiência e no seu tempo de vida.

De acordo com Mamede Filho (2013), o envelhecimento de um transformador tem a temperatura como o principal fator a ser levado em consideração.

A ventilação é empregada para controlar as temperaturas que esses equipamentos podem atingir. Principalmente quando esses dispositivos são instalados em lugares confinados.

Oliveira (2012) diz que em um recinto fechado, o processo de remover ou prover ar por meios naturais ou mecânicos é chamado de ventilação industrial. Para evitar prejuízos para máquinas e pessoas a ventilação fornece a limpeza e o controle das condições do ar.

Em acordo com Macintyre (1990), a ventilação pode ser compreendida como a movimentação de ar por meio de espaços confinados, com o objetivo de controlar e melhorar as condições do ambiente devido ao controle térmico.

Com a intenção de fornecer melhor eficiência e proteção aos transformadores, que são dispositivos de alto custo, é dimensionado um sistema de ventilação para garantir temperaturas próximas da ideal para a operação desses dispositivos e também é feita a seleção de ventiladores para garantir as condições do ar necessárias.

Posto isso, surge a problemática:

**Como dimensionar e selecionar um sistema de ventilação para garantir um bom funcionamento e uma boa expectativa de vida para um transformador em uma subestação de uma usina solar fotovoltaica?**

## **1.2 Justificativa**

Costa (2014) mostra que a garantia de que a temperatura à qual os equipamentos, sistemas e materiais estão submetidos não ultrapasse valores admissíveis é um dos principais fatores para assegurar o funcionamento correto de instalações elétricas e mecânicas.

Os transformadores são equipamentos que fazem parte do sistema de distribuição de energia elétrica. Como o consumo de energia elétrica vem aumentando ao longo dos anos, é necessário garantir a boa operação desses equipamentos.

Mamede filho (2013) diz que o transformador é um equipamento de custo elevado, que usualmente é construído para uma expectativa de vida útil de 30 anos, que representa o colapso dos materiais isolantes que estão inseridos no óleo. Já que, a expectativa de vida do transformador está ligada diretamente a temperatura, é importante a determinação da temperatura ambiente. Faz-se necessário a retirada de calor do recinto onde o transformador está instalado, afim de evitar que a elevação da temperatura ambiente prejudique a vida útil do mesmo.

Segundo Chapman (2013), as temperaturas nas regiões quentes dos enrolamentos de um transformador têm que ser limitadas com o intuito de aumentar a vida útil (tempo de utilização do transformador).

Assunção (2007) diz que as temperaturas elevadas são responsáveis pelo desgaste dos materiais isolantes. Cada projeto de transformador tem a característica de temperatura de operação, levando em consideração também a temperatura do ambiente e do carregamento imposto aos equipamentos.

Com isso, de acordo com Mamede Filho (2005), a ventilação é um mecanismo muito utilizado para aumentar a vida útil do transformador. O que garante maior confiabilidade, capacidade de carregamento e melhor rendimento do transformador.

Sendo assim, o dimensionamento de um sistema de ventilação para um transformador contido em um local confinado (pequena subestação) garantirá o bom funcionamento do equipamento, como também assegurará uma expectativa de vida adequada a um equipamento de grande importância para o sistema elétrico e que tem alto valor agregado.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Geral**

Fazer o dimensionamento e a seleção de um sistema de ventilação, em uma subestação, para garantir uma temperatura adequada de operação de um transformador, de forma a aumentar a vida útil do equipamento.

#### **1.3.2 Específicos**

- Realizar revisão bibliográfica sobre utilização da energia elétrica, transformadores, carga térmica e ventilação;
- Avaliar as condições do ambiente o qual o transformador será instalado;
- Calcular a carga térmica gerada no local confinado vinda do transformador e a ação do sol no local;
- Dimensionar, de acordo com a literatura, um sistema de ventilação que garanta um bom funcionamento do transformador e selecionar os equipamentos desse sistema.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Esse trabalho está dividido em cinco capítulos, no qual o primeiro apresenta a introdução, com a contextualização, formulação do problema e objetivos.

No segundo capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica, que mostra as utilizações e necessidades dos transformadores, como funciona esse dispositivo e suas perdas térmicas. Também é apresentado os conceitos de ventilação e o processo de dimensionamento analítico de um sistema para controle térmico.

O terceiro capítulo refere-se a metodologia de realização do trabalho. Será mostrado os métodos utilizados para os cálculos, as variáveis e os materiais usados.

No penúltimo capítulo é destacado os resultados obtidos com os cálculos feitos, e a avaliação dos resultados. No último capítulo é apresentada a conclusão do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Energia elétrica

O desenvolvimento da sociedade veio junto com o aumento da utilização de energia elétrica. A energia elétrica consumida hoje é transformada em luz, movimentação de motores, utilizada em diversos aparelhos elétricos e eletrônicos, como computadores, geladeiras, micro-ondas, chuveiros, entre outros, que se tornaram indispensáveis no cotidiano de muitas pessoas.

No mundo a energia elétrica é umas das fontes de energia mais utilizada. Segundo dados da Agência Internacional de Energia, em *Inglês International Energy Agency* (IEA, 2020b) o consumo de energia elétrica, em 2018, ficou atrás somente do consumo de produtos derivados do petróleo. O consumo de energia elétrica chegou a 1.918.779,0 ktoe (toneladas equivalentes de petróleo). A figura 1 mostra o consumo final de energia por fonte no mundo entre os anos de 1990 e 2018.

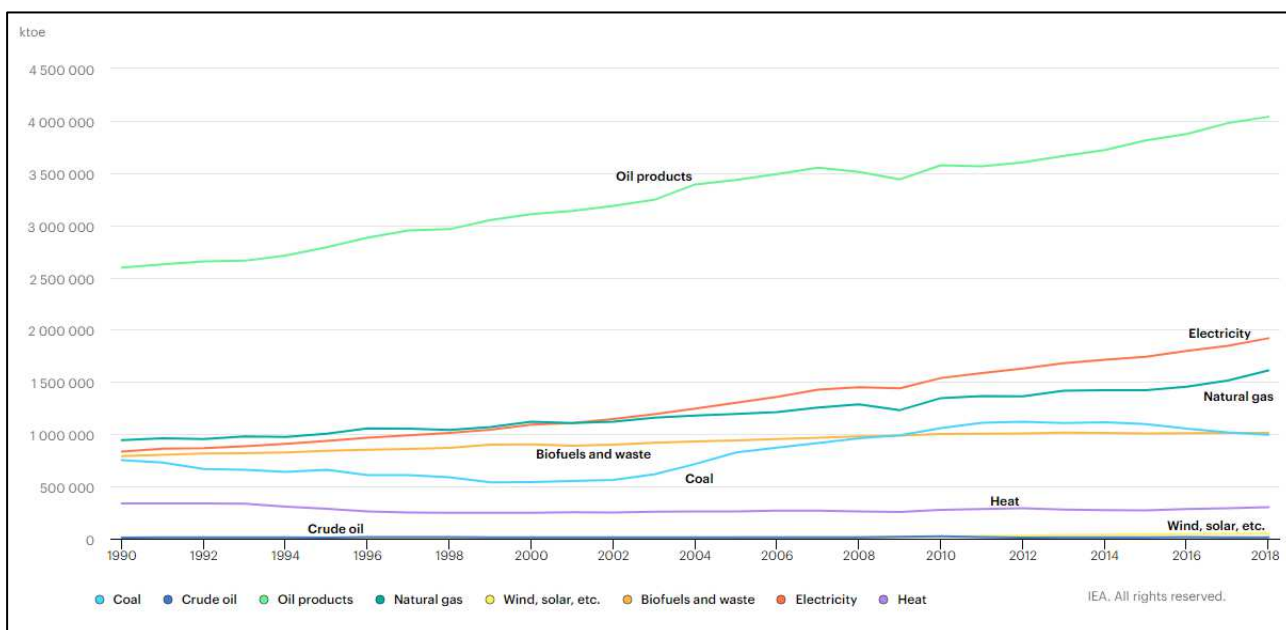


Figura 1 – Consumo final total por fonte, Mundo 1990-2018  
Fonte: (IEA, 2020b)

No mundo, segundo IEA (IEA, 2020a), o consumo de energia elétrica no ano de 2018 foi de 24738,9 TWh (terawatt-hora). Na figura 2 é possível observar como o consumo de energia elétrica vem aumentando ao longo dos anos.

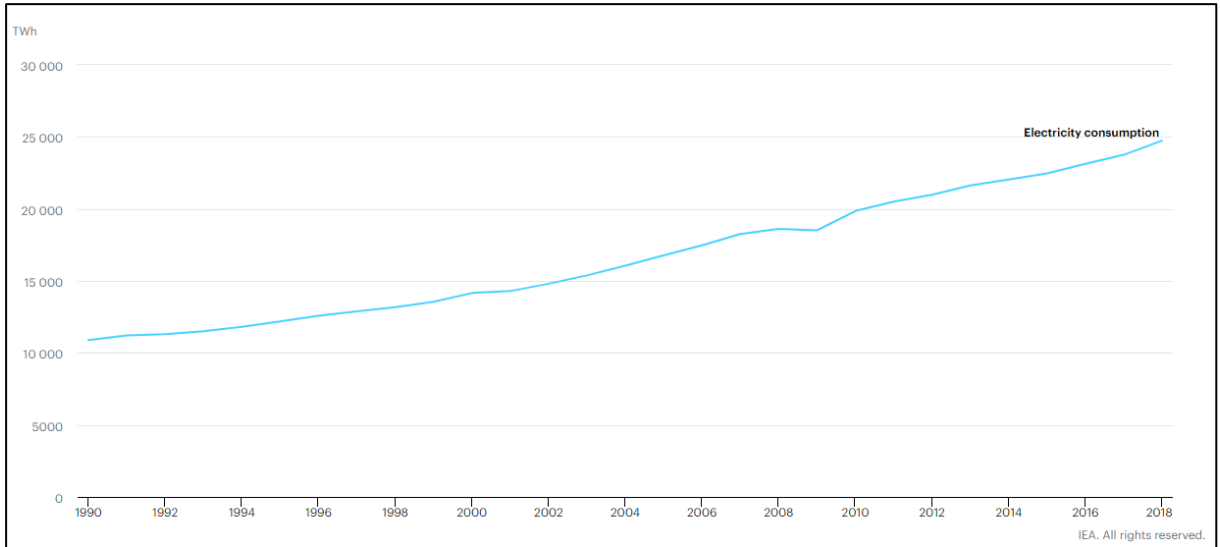


Figura 2 – Consumo de eletricidade, Mundo 1990-2018  
Fonte: (IEA, 2020a)

No Brasil, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020a), a qual é vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), o consumo de energia elétrica passou dos 480000 GWh no ano de 2019 e mostra um crescimento ao longo dos anos.

Ainda de acordo com dados do IEA (2020), há uma expectativa de aumento na demanda de energia elétrica no mundo, chegando em 2040, com quase o dobro de demanda em relação ao ano de 2018 em alguns países. A demanda global de eletricidade por região e expectativa até o ano de 2040 é mostrado na figura 3.

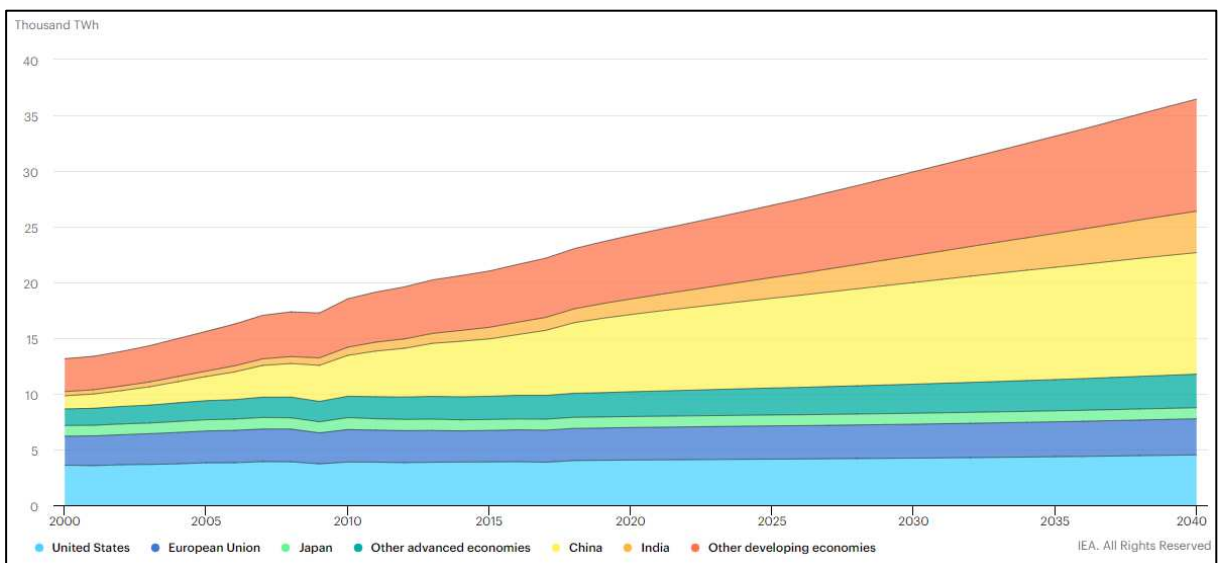


Figura 3 – Demanda global de eletricidade por região no Cenário de Políticas Declaradas, 2000-2040  
Fonte: (IEA, 2020)



### 2.1.1 Matriz energética

Conforme a EPE (2020b), matriz energética é um conjunto de fontes de energia. Isto é, retrata a quantidade de fontes a disposição de um país, estado ou mundo para suprir a demanda de energia. A matriz elétrica é o conjunto de fontes disponíveis para a geração de energia elétrica.

A Empresa de Pesquisa Energética e a Agência Internacional de Energia (2020b), mostram que em 2018, as fontes não renováveis são as principais da matriz energética mundial. A figura 4 indica que carvão, petróleo e gás natural são fontes predominantes da matriz energética global, as quais são fontes não renováveis e que emitem gases poluentes para a atmosfera.

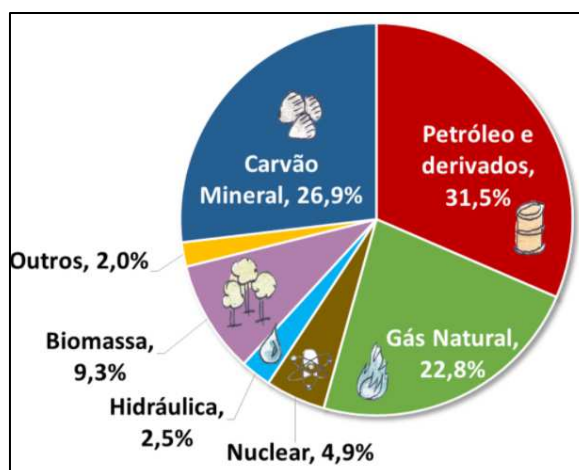


Figura 4 - Matriz energética mundial 2018  
Fonte: (EPE, 2020b)

A EPE e o IEA (2020b), mostram também, na figura 5, a matriz elétrica mundial que tem como fontes o carvão, gás natural, hidráulica e nuclear em sua maior parte. Porém já é possível ver fontes como energia solar, eólica, geotérmica, maré e biomassa, que são fontes renováveis e, ou, menos poluentes.

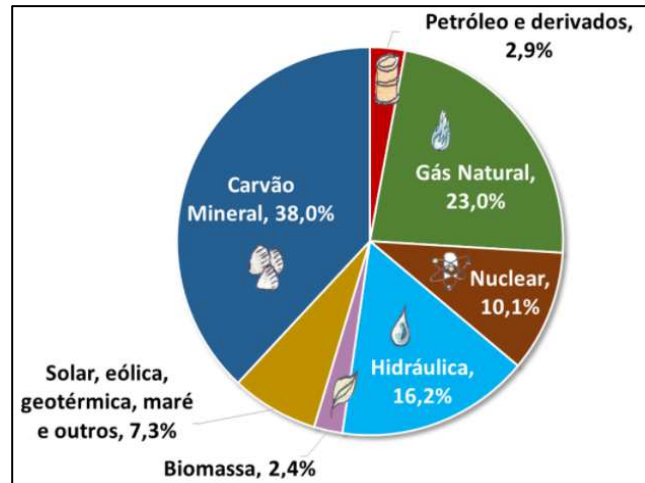


Figura 5 - Matriz Elétrica Mundial 2018  
Fonte: (EPE, 2020b)

O Brasil em 2019, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN), tem a matriz elétrica majoritariamente composta por recursos hídricos, cerca de 65% da matriz elétrica é composta por essa fonte. As outras grandes fontes de energia elétrica no Brasil é o gás natural, a biomassa, solar e eólica, como mostra na figura 6 (EPE, 2020b).

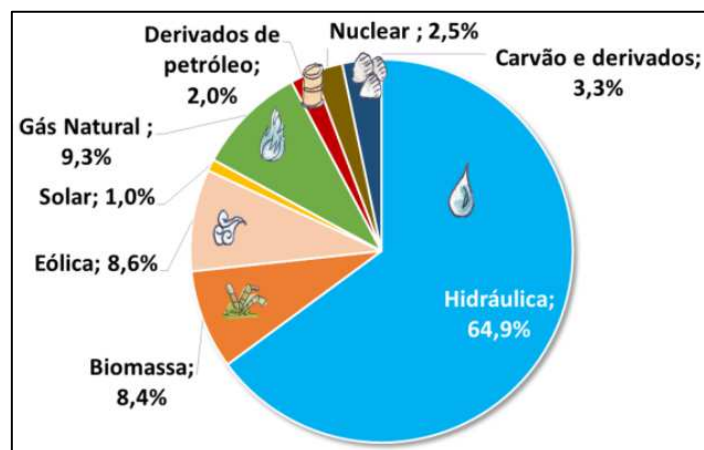


Figura 6 - Matriz Elétrica Brasileira 2019  
Fonte: (EPE, 2020b)

Essas informações indicam que são diversas as fontes para se conseguir a energia elétrica, o que provoca características diferentes de tensão em suas usinas e subestações.

### 2.1.2 Utilização de Energia Elétrica

No cenário global o consumo de energia elétrica representa 19% da matriz energética no ano de 2018. Estudos de cenários futuros mostram que essa parcela pode chegar em 24% em 2040 (IEA, 2019).

Segundo dados coletados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020a), o Brasil teve um consumo de energia elétrica de 472.242 GWh no ano de 2018. Esse consumo em 1995 foi de 243.074 GWh, mostrando o aumento da utilização da energia elétrica nas residências, indústrias e comércio. Esses valores de consumo são apresentados na figura 7. Isso mostra que cada vez mais é preciso de estudos para melhoria de eficiência das fontes de produção e distribuição de energia elétrica, como também de seus equipamentos.

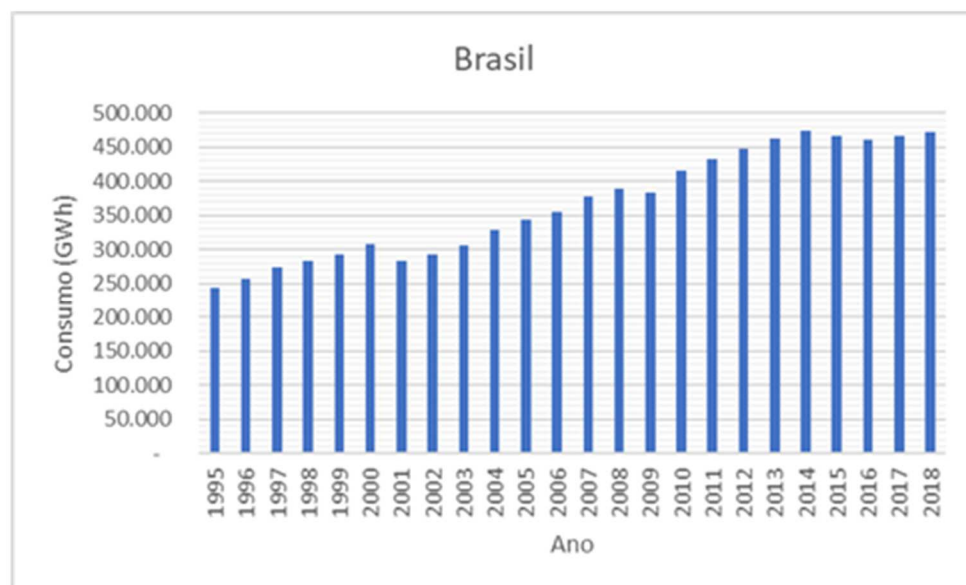


Figura 7 - Consumo em GWh de energia elétrica anual no Brasil  
Fonte:(EPE, 2020a)

Junto ao crescimento de consumo e com a preocupação da emissão de gases que aumentam o efeito estufa, gerados principalmente por fontes não renováveis de energia, a busca por alternativas de uma matriz energética mais limpa vem se intensificando. A energia elétrica quando adquirida de fontes não poluentes, como a solar, eólica, hidráulica torna-se uma opção bastante interessante a ser utilizada.

Com acordos de redução de poluentes, como o acordo de Paris (UNITED NATION., 2015), espera-se um movimento para se utilizar mais energia elétrica do que a utilização de

derivados de petróleo como fonte energética. Já é percebido a difusão os carros elétricos para a substituição dos carros a motores a combustão interna, entre outras substituições mais amigáveis ao meio ambiente.

### 2.1.3 Energia solar fotovoltaica

Uma alternativa energética de grande expectativa é a energia solar, já que a radiação solar, anual, incidente sobre a Terra equivale a dez mil vezes a energia consumida pela população mundial. E essa energia é renovável e causa pouco impacto ao meio ambiente (PERAZA, 2013).

Os valores de radiação solar global que incide sobre o território brasileiro estão entre 1550 e 2400 kWh/m<sup>2</sup> por ano. Como, a maior parte do território nacional está próximo a linha do Equador, não apresenta grandes variações de radiação solar ao longo do ano. Isso mostra, que a energia solar fotovoltaica constitui uma fonte renovável bastante convidativa de se usar (BARBOSA FILHO *et al.*, 2015).

Para geração de energia elétrica utilizando a radiação solar é necessário o uso de células fotovoltaicas que convertem diretamente a luz do sol em eletricidade. São feitas a associação dos módulos para a formação do painel solar, a fim de obter níveis de tensão e corrente desejadas. É necessário fazer a associação de módulos para obter uma potência e tensão suficiente para suprir a demanda do sistema (PERAZA, 2013).

A figura 8 mostra a representação esquemática dos componentes fotovoltaicos.

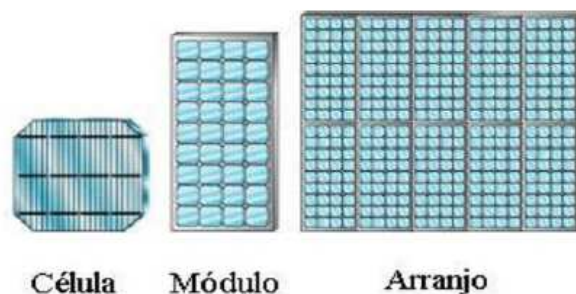


Figura 8 - Representação esquemática - célula, módulo e arranjo fotovoltaico  
Fonte: (PERAZA, 2013, p. 16)(PERAZA, 2013)

Painéis solares, sistema de fixação e o inversor, que faz o papel de converter CC para CA, são os elementos principais para instalações solares fotovoltaicas que serão conectadas a rede. Quando se trata de uma grande central fotovoltaica que fornece energia elétrica a rede é necessário mais inversores e transformadores. A figura 9 mostra um diagrama esquemático de uma central fotovoltaica.

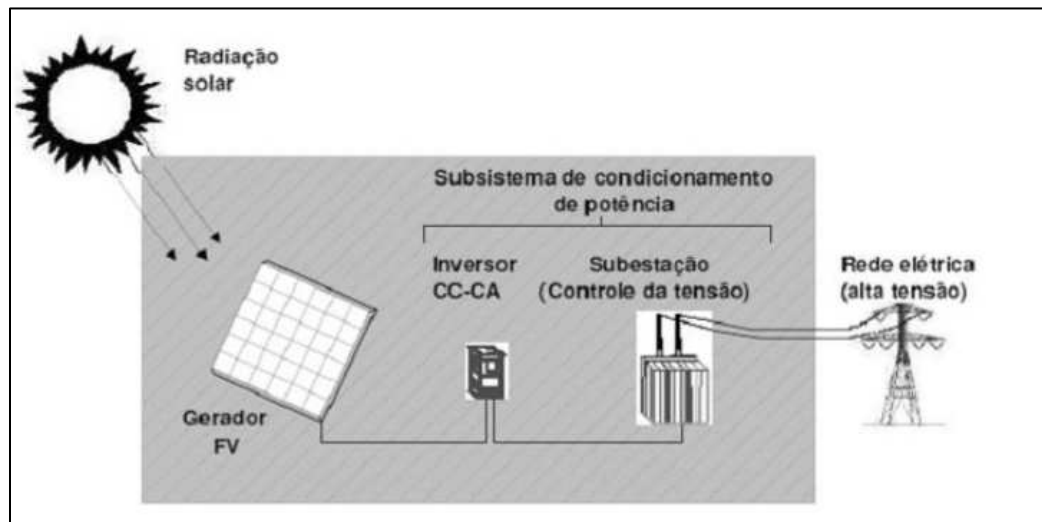


Figura 9 - Diagrama esquemático de uma central fotovoltaica  
Fonte:(PERAZA, 2013, p. 18)

A figura 10 mostra a usina solar de Tauá, feita em 2011, no sertão do Ceará com capacidade de 1000 kWp (1MWp). Esta usina garante energia para 650 casas populares (SOLAR, 2020).



Figura 10 - Usina solar de Tauá  
Fonte:(SOLAR, 2020)

#### 2.1.4 Distribuição de energia elétrica

Stevenson (1986) mostra que as tensões de grandes geradores, onde ocorre a produção da energia elétrica, tem tensões na faixa de 13,8kV a 24kV. Porém, os geradores maiores e mais modernos são desenvolvidos para tensões de 18kV a 24kV. É mostrado também que não houve uma padronização nas tensões para geradores.

A dita alta tensão (AT) são 115, 138 e 230 kV, a extra alta tensão (EAT) são 345, 500 e 765 kV. Ainda há pesquisas de ultra alta tensão (UAT) que seria tensões de 1000 a 1500 kV. Levando em consideração a capacidade de transmissão da linha em megavolt-ampères (MVA) mostra a vantagem de tensões de linha de transmissão com níveis mais elevados de tensão (STEVENSON, 1986).

Ainda de acordo com Stevenson (1986, p. 5):

A capacidade das linhas de mesmo comprimento varia aproximadamente segundo uma relação um pouco maior do que o quadrado da tensão. Entretanto, não é possível especificar a capacidade de uma linha para uma dada tensão porque a capacidade depende de limites térmicos do condutor, queda de tensão permitida, confiabilidade e exigências para ser mantido o sincronismo entre as máquinas do sistema, o que é conhecido por estabilidade. Muitos desses fatores são dependentes do comprimento da linha.

É mostrado por Stevenson (1986), que na subestação de transmissão é feita a primeira redução de tensão que fica entre 34,5 a 138 kV, isso é dependente da tensão da linha. A segunda redução de tensão é feita na subestação de distribuição, e as tensões ficam na faixa de 4 a 34,5 kV, sendo mais comum entre 11 e 15 kV. A tensão de 12.470 V entre linhas, é muito usada, significando que entre uma linha e o terra, ou neutro, tem-se 7.200 V. Esse considerado o sistema primário e muitas indústrias utilizam essas cargas para sua alimentação, também é levado para alimentação dos transformadores de distribuição que oferecem tensões secundárias em circuitos monofásicos a três fios para o uso em domicílios. Nesse uso residencial, a tensão é de 240 V entre dois fios, 120 V em cada um, e o terceiro condutor sendo o aterramento.

#### 2.1.5 Necessidade do uso dos transformadores

Chapman (2013) descreve que o surgimento do transformador junto com o maior desenvolvimento das estações de geração de energia de corrente alternada (CA) anulou as restrições de alcance e capacidade de energia elétrica que existia devido a corrente contínua (CC) e suas baixas tensões. De forma ideal o transformador muda um nível de tensão CA em

outro nível de tensão sem prejudicar a potência elétrica real gerada. Um transformador que aumenta o nível de tensão, tem que diminuir o valor da corrente elétrica para manter a potência de entrada e saída do equipamento. Como isso, é possível a energia elétrica CA ser fornecida em um ponto central, seguidamente a sua tensão é elevada para transmissão em longas distâncias, com perdas bem menores, e depois a tensão é abaixada para valores onde se é usado.

Segundo Chapman (2013, p. 67):

Em um sistema de energia elétrica, as perdas de transmissão são proporcionais ao quadrado da corrente que circula nas linhas. Desse modo, usando transformadores, uma elevação da tensão de transmissão por um fator de 10 permitirá reduzir as perdas de transmissão elétrica em 100 vezes devido à redução das correntes de transmissão pelo mesmo fator.

Silva (2005) mostra que a busca das empresas do mercado de energia mundial pela redução de custos, visando uma maior produtividade e uma maior disponibilidade dos equipamentos essenciais, junto da modificação das políticas aplicadas pelas empresas que fornecem os serviços de energia, desde as produtoras até as distribuidoras. Estas empresas têm o objetivo de estabelecer uma relação de custo-benefício que satisfazem as expectativas, mantendo a confiabilidade do fornecimento de energia estabelecida pelos órgãos fiscalizadores.

Com esse pensamento, é preciso lembrar que os sistemas de distribuição de energia são compostos de diversos equipamentos. O equipamento de transformação tem uma grande importância no fornecimento de energia elétrica aos consumidores, desde a geração até a distribuição. Dito isso, é preciso garantir um bom comportamento desses equipamentos em relação ao seu envelhecimento natural. Essa preocupação é existente para impedir falhas simples ou até mesmo complexas que possa deixar o sistema improdutivo por um longo período o que pode acarretar em multas, falta de faturamento e, ou, não fornecimento aos consumidores, que pode implicar em desligamento de consumidores em suas residências, hospitais, indústrias, criando danos a diversos setores (SILVA, 2005).

## **2.2 Transformadores**

Mamede Filho (2013) define o transformador como um equipamento cuja operação é estática, e que por meio de indução eletromagnética faz a transferência de energia de um circuito chamado primário, para um ou mais circuitos, de nomes secundário e terciário, porém é mantida a mesma frequência com tensões e correntes diferentes.

Fitzgerald *et al.* (2004) aponta os transformadores como importantes componentes do sistema de corrente alternada de potência, que permitem a geração e a transferência de energia elétrica com tensões mais econômicas. E também, o transformador permite o uso da energia em tensão mais apropriada para um dispositivo específico. Estes equipamentos também são bastante utilizados em circuitos com baixa potência, em circuitos eletrônicos e nos de controle.

Apontado por Mamede Filho (2013), para que haja uma segurança no consumo de energia elétrica pelos usuários, é necessário que a alimentação seja inferior a 500 V. No Brasil, as tensões nominais que são aplicadas pelas concessionárias de energia elétrica no sistema de distribuição secundário, normalmente, são 380 V entre fases e de 220 V entre fase e neutro na região nordeste, e já na região sul é encontrado 220 V entre fases e 127 V entre fase e neutro.

É também mostrado por Mamede Filho (2013) que a utilização dos transformadores vai desde as usinas de produção, onde as tensões são elevadas para garantir a transmissão de potência de forma mais econômica, até os pontos onde a tensão será reduzida ao nível de subtransmissão ou distribuição para o consumo. A figura 11 mostra um transformador regulador na usina de Itaipu, enquanto a figura 12 mostra um transformador, comumente visto em postes urbanos, que faz a distribuição para as residências.



Figura 11 - Transformador regulador na Usina de Itaipu  
Fonte: (VELÁZQUEZ; MORA; ALVES, 2009, p. 2)





Figura 12 - Transformador em poste  
Fonte:(BRASIL, 2017)

Assunção (2007) apresenta que há uma grande quantidade de transformadores instalados em concessionárias do ramo de energia elétrica. Por se tratar de um instrumento com expectativa de vida limitada, é possível que ocorra a necessidade de troca do equipamento ou manutenção não programada devido algum problema de operação. Apesar dos transformadores de potência serem dispositivos de alta confiabilidade, é desejável reduzir ainda mais as falhas, pelo grande problema que se apresenta quando há um defeito inesperado.

Um dos parâmetros considerados para projetar a potência nominal de um transformador, é a temperatura ambiente constante, usualmente igual a 30°C. Porém, as características naturais reais do local onde o transformador será instalado são diferentes. Então a capacidade de carregamento do transformador é limitada pela sua capacidade térmica e não pela capacidade nominal. Portanto, para manter o carregamento do transformador no limite da capacidade térmica é preciso observar a temperatura de operação do transformador, a temperatura ambiente e controlar o carregamento elétrico, para impedir uma perda de vida útil e garantir confiabilidade operacional (ASSUNÇÃO, 2007).

### 2.2.1 Princípios de funcionamento

Em concordância com Kosow (1982) a operação do transformador é de acordo com o princípio da indução mútua entre duas (ou mais) bobinas ou acoplamento de circuitos indutivos.

Carvalho (2011) mostra que a base do funcionamento do transformador é estudada por Faraday e Lenz com os fundamentos do eletromagnetismo. Com o movimento de um campo magnético de um condutor, há o aparecimento de uma corrente induzida. Ou seja, um campo magnético variável causa um fluxo magnético variável.

De acordo com Fitzgerald *et al.* (2004), um dos enrolamentos (bobinas), o primário, tem a conexão com uma fonte de tensão CA. Este produzirá um fluxo magnético alternado onde sua amplitude depende da tensão, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras. Esse fluxo se une ao enrolamento secundário, induzindo assim uma tensão que é dependente do número de espiras do secundário, com isso qualquer relação de transformação pode ser conseguida.

Fitzgerald *et al.* (2004) diz que o funcionamento de um transformador depende primariamente que exista um fluxo comum, variável no tempo, unindo duas bobinas. Isso pode acontecer com bobinas acopladas pelo ar, porém, o acoplamento entre as bobinas pode ser mais eficiente utilizando núcleo de material ferromagnético, como o ferro. Deste modo o fluxo comum fica em um caminho demarcado em sua maior parte, esse caminho tem maior permeabilidade, na união das bobinas.

### 2.2.2 Tipos de Transformadores

Chapman (2013) explica que existem os transformadores de potência com dois tipos de núcleo. Um baseia-se em um bloco retangular laminado simples de aço com o envolvimento dos enrolamentos nos dois lados do retângulo. Esse seria o tipo núcleo envolvido, que é mostrado na figura 13.

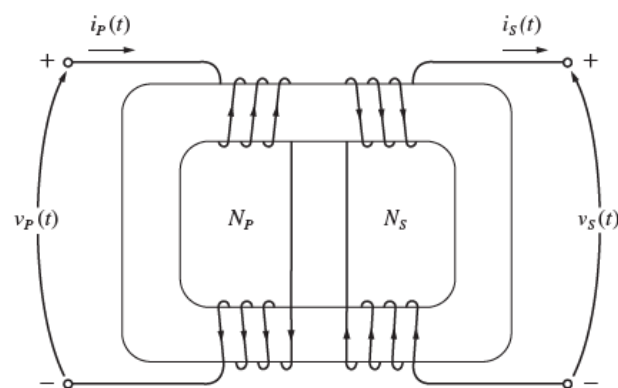


Figura 13 - Construção de transformador do tipo núcleo envolvido  
Fonte: (CHAPMAN, 2013, p. 68)

Outro tipo de transformador é mostrado por Chapman (2013), onde um núcleo laminado de três pernas com os enrolamentos envolvendo a perna central, sendo essa construção chamada de núcleo envolvente, e é mostrada na figura 14.

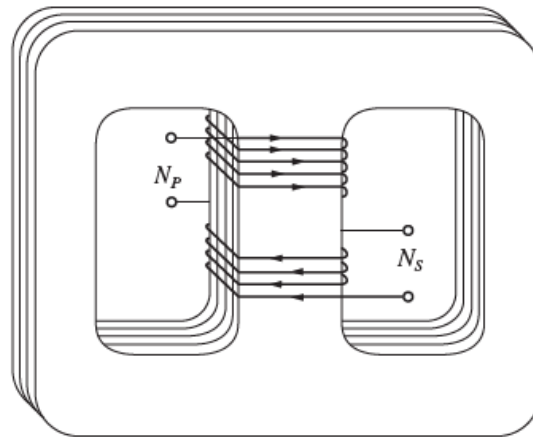


Figura 14 - Construção de transformador do tipo núcleo envolvente  
Fonte: (CHAPMAN, 2013, p. 68)

### 2.2.3 Características elétricas e térmicas

Mamede Filho (2005) informa que os transformadores tem características elétricas que precisam de cuidado no estudo antes da utilização, visando uma segurança e economia na operação desses equipamentos.

Segundo Mamede Filho (2005, p.492), “a potência nominal de um transformador é o valor convencional da potência aparente que serve de base para o projeto, aos ensaios e às garantias do fabricante e que determina a corrente nominal que circula, sob tensão nominal.”

De acordo com Mamede Filho (2005) a tensão aplicada aos terminais de linha da bobina do transformador é a tensão nominal. A corrente nominal é a corrente que passa no terminal das bobinas. A frequência nominal é a que foi determinada em todos os parâmetros do transformador. Assim essas são as características elétricas do transformador.

Mamede Filho (2005) apresenta também as características térmicas dos transformadores, que fica relacionada com as perdas existentes nos mesmos. Em forma de calor, a perda é a potência absorvida e dissipada pelo transformador, no seu núcleo de ferro e nos enrolamentos primário e secundário.

Boa parte dos transformadores de potência tem uma construção parecida. Essas partes são o núcleo trifásico (1), enrolamento de baixa tensão (2), enrolamento de alta tensão (3), enrolamento de regulação (4), ligações de derivações (5), buchas de baixa tensão (6), buchas de alta tensão (7), vigas de prensagem do núcleo (8), comutador de tensão em carga (9),

acionamento motorizado tanque (10), tanque de expansão (11) e radiadores (12). A figura 15 mostras esses componentes (SILVA, 2005).

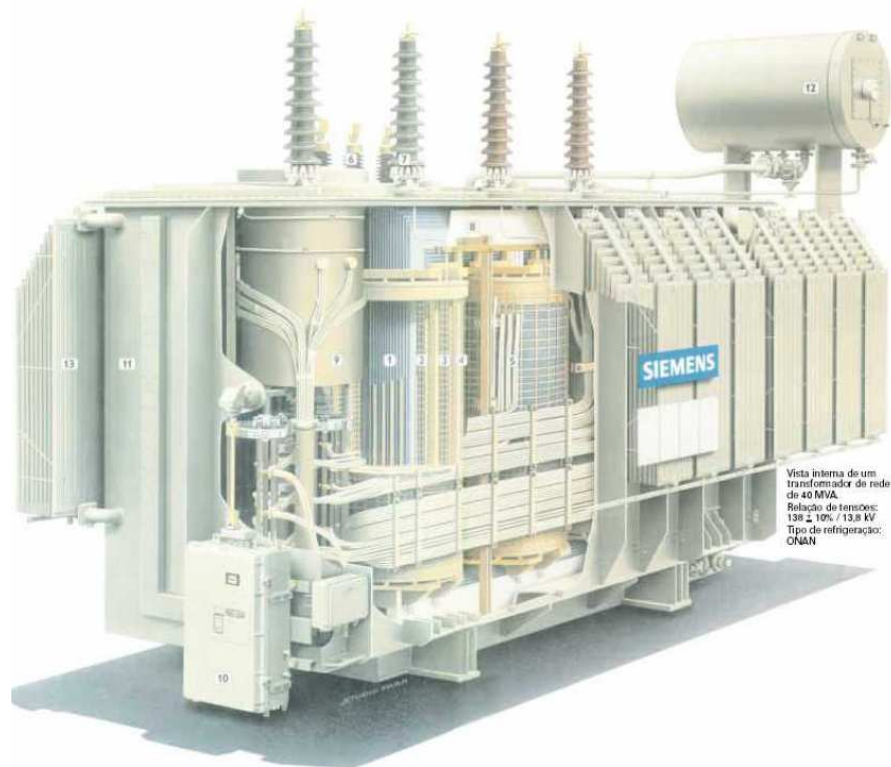


Figura 15 - Transformador Trifásico  
 Fonte: (SILVA, 2005, p. 14)

O núcleo é onde acontece a transformação de potência, produzidos oriundos de chapas de aço sílico empilhadas. Os enrolamentos de alta e baixa tensão são fabricados com fios simples ou junções de fios de cobre. As buchas de alta e baixa tensão são partes utilizadas para fazer a passagem de um condutor de forma isolada entre uma parede de material condutor. O comutador de tensão é o equipamento capaz de fazer o chaveamento sob carga entre as derivações do enrolamento. O tanque do transformador de potência tem como função fornecer abrigo a parte ativa e o óleo isolante. O tanque de expansão tem o intuito de garantir um espaço a mais de óleo caso haja uma dilatação térmica do mesmo (SILVA, 2005).

## 2.2.4 Características quanto ao meio isolante

Assunção (2007) mostra que em torno dos anos de 1880 não existia muitos materiais isolantes elétricos, sendo os transformadores pequenos do tipo seco e isolados com celulose. Com o surgimento de transformadores de maior potência, foi necessário melhores isolantes e maior eficiência na dissipação de perdas dos enrolamentos e do núcleo. Uma combinação, que ocasionou boas características térmicas e elétricas, foi o óleo mineral com o papel ou papelão.

De acordo com Mamede Filho (2013), os transformadores são classificados em dois grupos em relação ao meio isolante, transformador a seco e o transformador em líquido isolante.

### a) Transformador a seco

Equipamento de alto custo em relação aos transformadores em líquido isolante. Utilizados onde o perigo de incêndio é maior, como na indústria de petróleo ou em locais onde é proibido o uso de transformadores a óleo mineral. O isolante usado na chapa é feito com produto inorgânico a base de resina (MAMEDE FILHO, 2013).

### b) Transformador a líquido isolante

Esse tipo de transformador é usado de forma mais geral em indústrias com plantas comuns. São usados normalmente o óleo mineral, silicone e ascarel como tipos de líquidos isolantes. O ascarel é proibido em território brasileiro. A figura 16 mostra as partes que compõem um transformador a óleo mineral (MAMEDE FILHO, 2013).

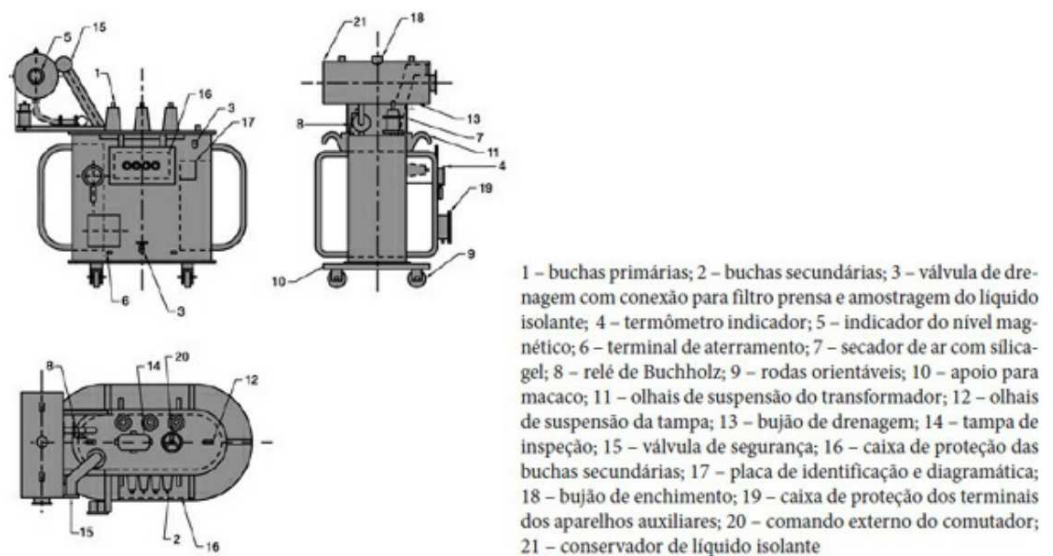


Figura 16 - Partes componentes de um transformador a óleo mineral

Fonte: (MAMEDE FILHO, 2013, p. 702)

O tanque do transformador é a parte metálica onde se encontra o núcleo, onde contém o líquido isolante, e transmite o calor gerado na parte ativa para o meio exterior. Os tanques são confeccionados de material que resista a corrosão, como alumínios especiais. O conservador de líquido isolante tem a função de receber o líquido vindo do tanque quando ele se expande devido ao aquecimento referente as perdas (MAMEDE FILHO, 2013).

Por se tratarem de modelos seguros e econômicos, dentro de suas limitações técnicas, esses materiais isolantes são amplamente utilizados nos dias atuais. A temperatura máxima que o isolante pode aguentar, sem danos a vida útil de operação, é uma das principais limitações (ASSUNÇÃO, 2007).

### 2.2.5 Isolantes

A função principal dos isolantes, em equipamentos elétricos de alta tensão, é diminuir o fluxo de corrente entre condutores que apresentam um gradiente de potencial elétrico, oferecendo suporte ao campo elétrico resultante. A troca térmica também é um campo de atuação dos isolantes sobre os condutores, portando a estabilidade térmica adequada garante propriedades mecânicas capazes de suportar forças eletromagnéticas e também ter estabilidade química para garantir o papel de isolamento elétrica (ASSUNÇÃO, 2007).

Desde o começo do século XX busca-se materiais isolantes que garantam proteção e economia ao transformador. Começando com materiais a base de celulose, como o papel Kraft, que suporta temperaturas máximas de 95°C a 98°C. Na década de 1950 surgiu os aditivos químicos aplicados ao papel, que aumentaram a vida útil e permitiu temperaturas de operação entre 95°C e 110°C. O papel sintético de fibras de aramida, que surgiu perto de 1960, apresentava uma capacidade isolante boa a temperatura de 220°C, devido às fortes ligações químicas observadas em suas moléculas. Porém apresenta um custo de 10 a 50 vezes ao do papel Kraft, usados assim só em aplicações específicas (ASSUNÇÃO, 2007).

E então surgiu a combinação de materiais como isolantes de alta temperatura, que são o óleo mineral e a celulose. Essa combinação tem grande aplicabilidade em grandes transformadores de potência. O isolante sólido de alta temperatura, criado na década de 1980, só é utilizado em locais que apresentam benefícios dentro do transformador. O resto da isolamento é produzida com papel isolante comum, e o óleo mineral é utilizado na refrigeração (ASSUNÇÃO, 2007).

A figura 17 ilustra um sistema de isolamento híbrido, combinação de óleo e celulose, que podem ser encontradas em transformadores.

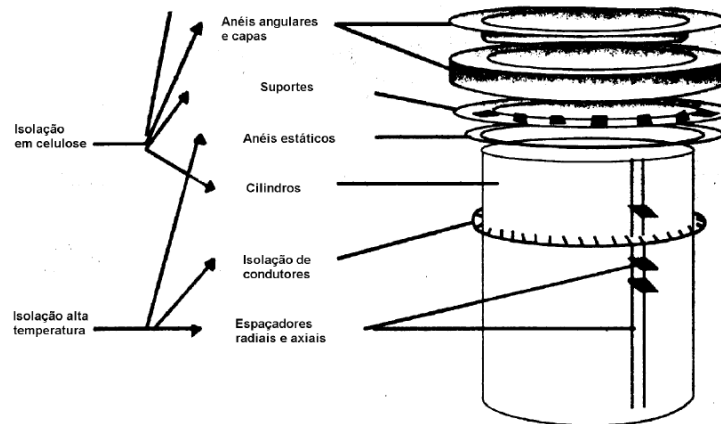


Figura 17 - Sistema de isolamento híbrido  
Fonte: (ASSUNÇÃO, 2007, p. 9)

### 2.2.6 Perdas

“Perda é a potência absorvida pelo transformador e dissipada, em forma de calor, pelos enrolamentos primários e secundários e pelo núcleo de ferro” (MAMEDE FILHO, 2013, p. 740).

Assunção (2007) diz que por se tratar de equipamentos necessários no sistema elétrico, a perda de transformadores de potência resulta em um impacto importante no aumento de custo e na qualidade do sistema. A operação desse tipo de equipamento tem grande influência pelas propriedades dos materiais isoladores que os compõem, que precisam ter suas características dielétricas ao longo dos 25 a 30 anos de funcionamento.

Por se tratarem de máquinas estáticas, os transformadores não apresentam perdas mecânicas comuns em equipamentos rotativos, sendo assim suas perdas vem por efeito Joule nos circuitos elétricos, perdas magnéticas no núcleo do equipamento e perdas adicionais. Perdas no cobre, ou nos enrolamentos é a denominação das perdas por efeito Joule, já as perdas de Foucault e histerese são a denominação das perdas nos circuitos magnéticos. (MONIZ, 2007)

A perda por efeito Joule ocorre pela corrente alternada que circula no condutor do enrolamento. Os fluxos magnéticos dispersos no enrolamento, núcleo, paredes de tanque e entre outras partes da estrutura ocasiona as perdas por correntes parasitas no equipamento de transformação. A perda no enrolamento se dá na soma das perdas por correntes parasitas e pelo efeito Joule (MONIZ, 2007).

O fluxo magnético alternado faz com que o núcleo apresente perda no material magnético, que é composta pela perda por histerese, a qual depende da natureza magnética do material usada na confecção do núcleo. Já a perda por corrente de Foucault no enrolamento depende da corrente da carga aplicada, e no núcleo depende da indução magnética (MONIZ, 2007).

Observa-se também, com o avanço dos aparelhos, equipamentos eletrônicos e junto o uso de aparelhos de transformação, cargas não lineares e as distorções nas formas de ondas das correntes. Aumentando assim as perdas adicionais, que elevam ainda mais a temperatura dos transformadores, comprometendo a isolação e diminuindo a expectativa de vida, dado aos efeitos das correntes e tensões não senoidais que causam a perda de natureza não harmônica (MONIZ, 2007).

Pode ocorrer sobrecargas nos equipamentos de transformação em um intervalo de tempo, ou seja, aplicação de carga superior à carga nominal, sem a perda de vida útil do equipamento. Porém, para que não ocorra essa perda é necessário que a carga aplicada no equipamento no restante de tempo seja menor que a nominal. Com isso, é possível compensar a maior perda de vida, na hora de ponta, com a menor perda de vida, na hora de carga inferior (MONIZ, 2007).

Essas perdas citadas são transformadas em dissipação de calor, e atrapalham no rendimento dos transformadores, implicando assim na necessidade de ventilação para se conseguir uma melhor eficiência na operação desses equipamentos.

### **2.2.7 Expectativa de vida do transformador**

Segundo Mamede Filho (2013), os transformadores tem temperaturas máximas que podem ser atingidas a fim de garantirem o carregamento adequado e uma vida útil correta. Foi observado também que a temperatura ambiente tem influência na perda de vida útil de um transformador, já que a temperatura dos enrolamentos é definida como a temperatura ambiente mais a elevação máxima de temperatura permitida.

O aumento de 55°C sobre a temperatura ambiente média era o considerado como projeto de enrolamento antes do surgimento de materiais isolantes de celulose termicamente elevados. Adotando 10°C de aumento de temperatura no ponto mais quente, tendo assim uma temperatura média de 95°C com uma vida útil normal, possibilitando assim uma temperatura ambiente máxima de 40°C. As normas da Europa permitiram o aumento médio de temperatura no enrolamento de 65°C sobre a temperatura ambiente, quando se utilizava convecção natural como forma de dissipação de calor, e 70°C para convecção forçada. O Instituto de Engenheiros



Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) propõem temperatura operacional da celulose termicamente elevada de 95°C a 120°C. Já a temperatura máxima permitida do óleo empregado nos transformadores é de 105°C em sistemas convencionais. Sendo a elevação máxima de temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente é de 60°C. A tabela 1 mostra os limites máximos de temperatura para sistema de isolamento elétrica (SIE) (ASSUNÇÃO, 2007).

Tabela 1 - Limites máximos de temperatura para sistemas de isolamento

<b>Elevação média da temperatura do SIE [°C]</b>	<b>SIE 65</b>	<b>SIE Híbrido 95</b>	<b>SIE Híbrido 115</b>
<b>Elevação máxima de temperatura do ponto mais quente do enrolamento [°C]</b>	80	130	150
<b>Temperatura ambiente máxima [°C]</b>	40	40	40
<b>Ponto mais quente do enrolamento [°C]</b>	120	170	190
<b>Temperatura máxima do topo do óleo [°C]</b>	105	105	105
<b>Ponto mais quente da celulose [°C]</b>	120	120	120

Fonte: (ASSUNÇÃO, 2007, p. 14)

Quando a temperatura do óleo chega a 130°C, a concentração de oxigênio no óleo diminui, ocorrendo assim reações de oxidação nos sistemas de óleo mineral e papel isolante. Isso implica dizer que acima dessa temperatura o surgimento de gases no óleo isolante é feito de maneira mais rápida, podendo ocasionar problemas no equipamento e também envelhecimento prematuro (MONIZ, 2007).

Silva (2005) mostra que alguns dos problemas que a elevação da temperatura de um transformador pode apresentar, e diminuir a sua confiabilidade de operação, e impactar no envelhecimento precoce do equipamento são:

- Aumento dos gases liberados pelo isolante dos enrolamentos e dos condutores;
- Aumento dos gases liberados pelo isolante adjacente a estrutura metálica;
- Diminuição da resistência mecânica dos condutores e da isolamento estrutural;
- Excessiva expansão térmica dos condutores, isolantes e partes estruturais, ocorrendo deformações permanentes, ocasionando possíveis falhas mecânicas e elétricas;

- Temperatura do topo de óleo acima de 105°C pode ocasionar pressão interna do tanque insegura, fazendo o dispositivo de alívio de pressão funcionar;
- Redução da vida útil do isolamento sólido em contato com óleo e o enrolamento.

### 2.2.8 O efeito da temperatura ambiente no sobre-carregamento dos transformadores

Em razão da contribuição na elevação da temperatura do transformador a qualquer carga, a temperatura ambiente exerce um fator importante na capacidade de carregamento de um transformador. A elevação da temperatura ambiente faz com que haja um aumento na temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento, possibilitando assim um aumento de danos térmicos (MONIZ, 2007).

Um transformador com isolamento feito com o uso de óleo e arrefecido a ar, operando em carga nominal, a temperatura ambiente não deve atingir valores superiores a 40°C e a temperatura do topo de óleo deve ter o limite de 55°C, para transformadores de isolamento de 55°C, e 65°C, para transformadores de isolamento de 65°C. Mas a vida útil do equipamento de transformação pode ser maior que a vida estimada, ou menor, devido as nuances da aplicação de carga e das variações de temperatura ambiente (MONIZ, 2007).

Eventualmente é que a temperatura máxima aceitável coincide com um transformador em plena carga. Porém quando isso ocorre, por um intervalo de tempo grande, é possível que apresente uma redução na vida útil do transformador. Com isso, a temperatura média diária não deve ultrapassar os 30°C para uma temperatura máxima de 40°C (MONIZ, 2007).

A operação do equipamento de transformação tem sua carga limitada pela geração de calor. Portanto quanto maior for a dissipação de calor para o ambiente, maior será a capacidade do transformador suportar sobre-carregamento, que ocasiona o excesso de aquecimento e a diminuição da vida útil do equipamento. (MONIZ, 2007)

A figura 18 mostra alguns valores de como a temperatura ambiente influencia na temperatura do topo de óleo e na temperatura do ponto mais quente, com a variação do tempo de duração de sobrecarga a qual o equipamento está submetido. Mostrando assim que quando a temperatura ambiente aumenta, as paredes internas do transformador têm elevação na temperatura, reduzindo assim a capacidade do transformador de suportar sobrecargas (MONIZ, 2007).

DURAÇÃO DO TEMPO DE PONTA DE CARGA, HORAS	TEMPERATURA AMBIENTE, °C	CARGA DURANTE O TEMPO DE PONTA, %	TEMPERATURA DO TOPO DO ÓLEO, °C	TEMPERATURA DO PONTO MAIS QUENTE, °C
0,5	10	150	47	95
	25	150	62	100
	40	150	67	105
1,0	10	150	56	104
	25	150	71	119
	40	131	81	120
2,0	10	150	70	118
	25	136	79	120
	40	118	87	120
4,0	10	137	78	120
	15	123	85	120
	40	108	92	120
4,0	10	137	78	120
	15	123	85	120
	40	108	92	120
8,0	10	129	83	120
	25	116	89	120
	40	102	94	120
24,0	10	126	84	120
	25	113	89	119
	40	100	95	120

Figura 18 - Perfil de carregamento do transformador  
 Fonte: (MONIZ, 2007, p. 69)

### 2.2.9 Geração de calor do transformador

A dissipação de calor de um transformador é oriunda das perdas de energia, mesmo que essa energia seja um valor pequeno em relação a toda energia que está em operação. Portanto, faz-se necessário retirar o calor das fontes de carga térmica, ou seja, do interior dos enrolamentos magnéticos para o óleo, que por sua vez troca calor com a estrutura do transformador e em seguida com o ambiente (BARROSO, 2014).

A operação dos transformadores faz com que internamente haja uma geração de carga térmica no seu interior. Para que não tenha nenhum dano na qualidade de isolamento dos enrolamentos esse calor gerado deve ser levado ao meio externo. O calor gerado no interior do equipamento é transferido pelo óleo mineral isolante, que é o meio de resfriamento interno, e que em contato com as paredes do tanque ou dos radiadores é transferido ao meio ambiente. Condução, radiação e convecção são as formas de transferência de calor realizadas (MAMEDE FILHO, 2013).

A radiação e a condução de calor são tipos de transferência de calor de pouca importância e pode ser desprezada. Assim, o processo de convecção é o maior responsável pela troca de calor entre o núcleo e o óleo e do tanque para o meio ambiente (MAMEDE FILHO, 2013).

### 2.2.10 Refrigeração dos transformadores

Silva (2005) apresenta a necessidade da dissipação de calor oriundos das perdas internas do transformador, com o intuito das temperaturas não ultrapassem limites pré-estabelecidos. Então são usados dispositivos que garantem uma maior eficiência na eliminação do calor entre o transformador e o ambiente, geralmente trocadores de calor ou radiadores. Os seguintes tipos de refrigerações são usados em transformadores:

- ONAN (óleo natural, ar natural): a circulação do óleo e do ar é feita de forma natural no interior e no exterior do equipamento;
- ONAF (óleo natural, ar forçado): a circulação do óleo é feita de forma natural, porém o ar no exterior dos radiadores circula com o auxílio de ventiladores;
- OFAF (óleo forçado, ar forçado): assemelhando ao ONAF, mas a movimentação de óleo é feita por bombas, tendo assim uma movimentação maior.

Alguns equipamentos de transformação também apresentam trocadores de calor e radiadores como dispositivos de troca térmica. Os trocadores de calor utilizam duas substâncias líquidas para fazer a transferência de calor, que geralmente são óleo isolante e água bruta. Os radiadores utilizam o ar como meio refrigerante para o óleo contido no transformador (SILVA, 2005).

Em transformadores, com isolamento em óleo e refrigeração natural, o processo de troca térmica se dá pela circulação natural do óleo entre os enrolamentos e núcleo transportando calor até a superfície no interior do compartimento de óleo. Com o aquecimento do óleo, há uma diminuição do seu peso específico e tende a subir fazendo com que o óleo presente na parte superior circule em contato com as paredes do tanque, a uma temperatura menor, e assim é criado um efeito de circulação conhecido como termossifão (BARROSO, 2014).

A dissipação de calor se torna mais difícil quanto maior for a potência do transformador, pois a potência é aumentada muito rapidamente em comparação com a superfície de troca térmica, com isso os reservatórios de óleo apresentam aletas que contem canais para a circulação do óleo ou mesmo, na parte exterior, tubos com a presença de ventilação forçada. Com isso, aumenta a capacidade de refrigeração (BARROSO, 2014).

### 2.2.11 Ventilação em locais de instalação dos transformadores

A carga térmica gerada pelos equipamentos localizados internamente aos postos de transformação tem grande impacto na temperatura do espaço. O calor gerado em função das

perdas provoca movimentação de ar dentro dos ambientes, que deve ser eliminado com o sistema de ventilação (BARROSO, 2014).

A figura 19 representa o posicionamento indicado para as aberturas por onde o ar será inserido e extraído do local de instalação de um transformador.

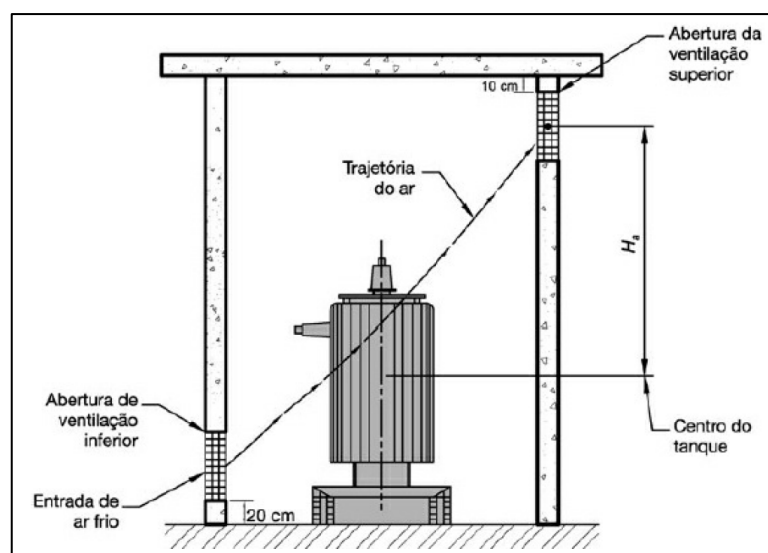


Figura 19 - Posicionamento de aberturas para ventilação do transformador em cubículos  
Fonte: (FILHO, 2013)

De acordo com Trael (2016) os locais de instalação devem ser protegidos de alagamentos e possuir condições de ventilação adequada. Além disso, as entradas de ar devem estar localizadas na parte inferior do ambiente, e as saídas na parte superior. As orientações de temperatura da NBR 5356-9 para os locais de instalação de transformadores são:

- Temperatura máxima: 40°C.
- Temperatura mínima: -25°C.
- Temperatura diária média de 30°C.

As cabines de transformação de alvenaria representam 31% dos tipos de construção do total de postos de transformação. Esses locais de instalação de transformadores possuem aberturas de ventilação em níveis de altura diferente para garantir a circulação de ar entre o interior e o exterior. O caminho do fluxo de ar entre o ponto de entrada e o ponto de saída deve ser considerado, a fim de avaliar a ação da ventilação (BARROSO, 2014).

O posicionamento e a forma dos postos de transformação têm influência para a necessidade de maior ou menor ventilação. As características do ambiente ou o sombreamento

a qual o local está submetido gera impacto na quantidade de ar necessária para ventilação (BARROSO, 2014).

### 2.3 Transferência de calor

A transferência de calor, segundo Çengel e Ghajar (2011), é a ciência da termodinâmica que aborda o quanto de calor que é transferido de um sistema para o outro, passando por um processo de equilíbrio, sem referência de tempo para que esse processo ocorra.

Incropera *et al.* (2008) define a transferência de calor como a energia térmica em trânsito devido a uma desigualdade de temperaturas no espaço. Mostra ainda, que em um meio ou entre meios, sempre que houver diferenças de temperaturas existirá a transferência de calor.

De acordo com Incropera *et al.* (2008), é importante que engenheiros saibam os mecanismos físicos que trazem o fundamento dos modos de transferência de calor e saibam usar as equações de taxa da quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Os mecanismos são condução, convecção e radiação.

#### 2.3.1 Condução

A transferência de energia resultante da interação de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas que estão bem próximas entre si, é chamado de condução. (ÇENGEL; GHAJAR, 2011)

Holman (1999) explica que quando existe uma diferença de temperatura em um corpo, existe uma transferência de energia do local de maior temperatura para o local de menor temperatura. É mostrado que a energia é transferida por condução e que a taxa de transferência de energia por unidade de área tem proporção com a diferença de temperatura.

Çengel e Ghajar (2011) mostram que a taxa de condução de calor é dada pela seguinte equação:

$$\text{Taxa de condução de calor} \propto \frac{(\text{Área}) \times (\text{Diferença de temperatura})}{\text{Espessura}} \quad (1)$$

Também pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\dot{Q}_{cond} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

Sendo:

- $\dot{Q}_{cond}$  : a taxa de condução de calor, a qual a unidade é Watt (W).
- $k$ : condutividade térmica do material, que é uma constante de proporcionalidade do material, isto é, a propriedade, em valor, do material de conduzir calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2011). Encontrada em tabelas e também pode ser calculada. No sistema SI, a unidade é (W/m.K).
- $T_1$  e  $T_2$  : temperaturas superficiais do corpo por onde a transferência de calor (K).
- $\Delta x$ : espessura da camada (m).
- $A$ : área da superfície de troca térmica (m<sup>2</sup>).

A figura 20 representa esquematicamente a condução de calor em um corpo ou fluido estacionário.

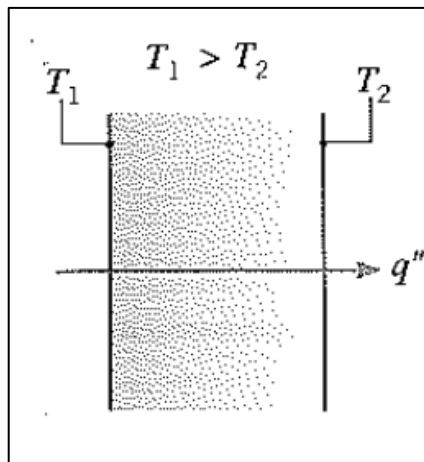


Figura 20 - Condução através de um sólido ou fluido estacionário  
Fonte: (INCROPERA *et al.*, 2008, p. 2)

Segundo Holman (1999), o sinal negativo apresentado na equação (2) é colocado para satisfazer a segunda lei da termodinâmica, isto significa que o calor flui para o local de menor temperatura.

### 2.3.2 Convecção

Convecção, segundo Çengel e Ghajar (2011), é a forma de transferência de calor que se dá entre uma superfície líquida ou gasosa, a qual está em movimento, em relação a uma superfície sólida, que assim mesclam os efeitos da condução e da movimentação de fluido.

De acordo com Incropera *et al.* (2008), a convecção abrange dois mecanismos de transferência de calor, a de troca de energia devido a movimentação difusa das moléculas e também a energia transferida com a movimentação global do fluido. O fluido em movimento está associado, em um instante qualquer, a um grande número de moléculas em movimento coletivo ou como um agregado. Esse movimento, com uma diferença de temperatura, contribui com a transferência de calor.

Çengel e Ghajar (2011) explicam que embora apresente uma certa complexidade, a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional a diferença de temperatura, sendo expressa conforme a lei de Newton de resfriamento:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Sendo:

- $\dot{Q}_{conv}$ : é a taxa de transferência de calor por convecção (W).
- $h$ : é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Uma propriedade característica de cada fluido, adquirida experimentalmente. Dada pela unidade no SI por (W/m<sup>2</sup>.K).
- $A_s$ : é área superficial a qual ocorre transferência de calor por convecção (m<sup>2</sup>)
- $T_s$ : é a temperatura da superfície.
- $T_\infty$ : é a temperatura do fluido que está suficientemente longe da superfície.

A figura 21 mostra o esquema da transferência de calor por convecção entre uma superfície e um fluido.

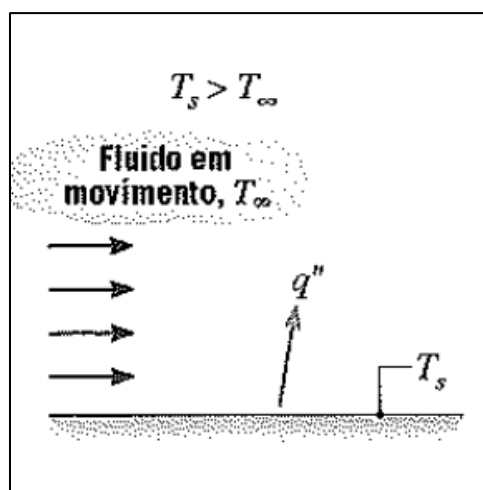


Figura 21 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento  
Fonte: (INCROPERA *et al.*, 2008, p. 2)



### 2.3.3 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pelo corpo que se encontra em uma temperatura diferente de zero. Apesar da forma da matéria, a emissão de energia pode ser relacionada a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que formam a matéria (INCROPERA et al., 2008).

Çengel e Ghajar (2011) afirmam que o mecanismo de transferência de calor por radiação é dado a partir da emissão de ondas eletromagnéticas e não exige a existência de um meio mediador. Pela lei de Stefan-Boltzmann da radiação térmica, a maior taxa de radiação que pode ser emitida por uma superfície é aquela emitida por um corpo negro. A taxa máxima de radiação emitida por uma superfície é dada por:

$$\dot{Q}_{max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (4)$$

Sendo:

- $\dot{Q}_{max}$ : taxa máxima de radiação emitida por uma superfície (W).
- $\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann que é igual a  $5,670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ .
- $T_s$ : temperatura termodinâmica na qual o corpo negro é encontrado (K).
- $A_s$ : área da superfície de transferência de calor (m<sup>2</sup>).

Çengel e Ghajar (2011) apresentam que as superfícies que não são um corpo negro exibem uma taxa de emissão com a seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (5)$$

Em que o  $\varepsilon$  representa a emissividade da superfície, com os valores entre 0 e 1, mostrando como o comportamento superficial se aproxima de um corpo negro, o qual tem a emissividade igual a 1. (ÇENGEL; GHAJAR, 2011)

A figura 22 mostra esquematicamente a troca de calor por radiação entre duas superfícies.

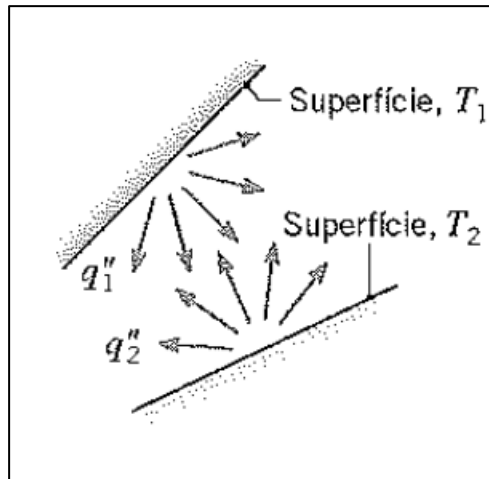


Figura 22 - Troca líquida de calor por radiação entre duas superfícies  
 Fonte: (INCROPERA *et al.*, 2008, p. 2)

## 2.4 Ventilação

### 2.4.1 Definição

Concordando com Macintyre (1990, p. 1) “ventilar significa deslocar o ar”. Em termos práticos o intuito de deslocar o ar é a retirada ou o fornecimento de ar a um local, isto é, neste ambiente há uma renovação de ar.

Macintyre (1990) diz que a renovação do ar permite, com uma limitação, controlar a temperatura e também a umidade de um recinto fechado.

Segundo Macintyre (1990, p.1):

A Ventilação Industrial é em geral entendida como a operação realizada por meios mecânicos que visem a controlar a temperatura, a distribuição do ar, a umidade e a eliminar agentes poluidores do ambiente, tais como gases, vapores, poeiras, fumos, névoas, microrganismos e odores, designados por “contaminantes” ou “poluentes”.

Em acordo com Finocchio e França (2009), deve-se contemplar primeiro o estudo da possibilidade da ventilação natural. Se não for possível faz-se necessário a implementação da ventilação forçada. Dito isso, é indicado o cálculo de sistema de ventilação natural e forçada, diagramas e modelos para o dimensionamento de instalações de ventilação e modelos eficientes de ventilação.

Os estudos sobre ventilação vêm avançando ao longo do tempo. A combinação entre ventilação natural e ventilação forçada estão sendo implementadas para o maior controle das

condições do ambiente. A ventilação é classificada em três tipos básicos, natural, forçada e combinada (BARROSO, 2014).

Em instalações industriais, a ventilação é normalmente usada para controlar as concentrações de contaminantes e poluentes ou as condições térmicas, e em vários casos, ambos. Nestas situações, a ventilação pode ser constituída simplesmente de uma corrente de ar exterior, aparentemente não contaminado e com temperatura menor (OLIVEIRA, 2012).

O movimento do ar dentro de um ambiente possibilitado pela pressão dinâmica e/ou temperatura fornecido por aberturas no teto, laterais e pisos, é denominado ventilação natural. A diferença de pressão entre as partes interna e externa e da resistência ao fluxo de ar fornecido pelas aberturas são os critérios controladores do fluxo de ar que entra e sai de um recinto por ventilação natural ou infiltração. A infiltração é um movimento de ar provocado pelos mesmos agentes físicos, porém não é controlado (OLIVEIRA, 2012).

O gradiente de pressões imposta pelo ar sobre o ambiente pode ser causado pelo vento ou pela diferença de densidade do ar de fora com o de dentro. O “efeito chaminé” é o principal fator para a diferença de densidade. São produzidas uma pressão interna negativa e uma corrente de ar entra pelas partes inferiores, ocasionando uma pressão interna positiva, e uma corrente de ar sai nas partes superiores do edifício, quando a temperatura interna é maior que a externa. A figura 23 mostra um esquema de como o fluxo de ar se comporta em um edifício de temperatura interna maior que a temperatura externa (OLIVEIRA, 2012).

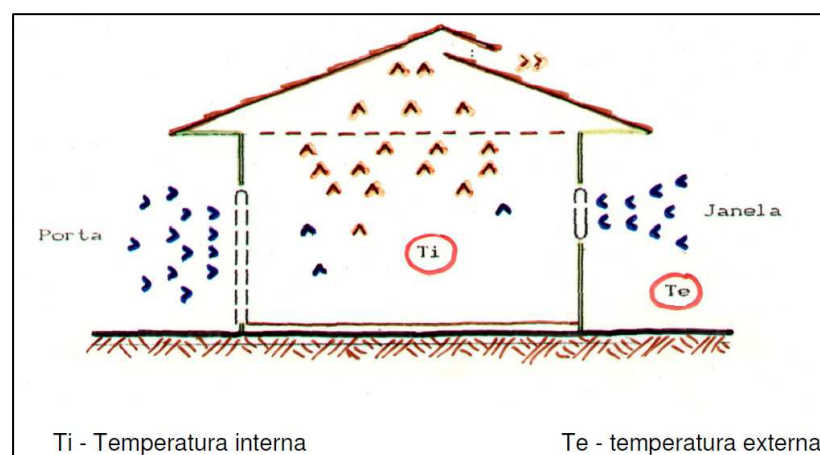


Figura 23 - Edifício com temperatura interna maior que a temperatura externa  
Fonte: (OLIVEIRA, 2012, p. 10)

O fluxo de ar dentro de um ambiente é dependente de três fatores: o movimento devido aos ventos externos, movimento devido a diferença de temperatura e o efeito das aberturas

desiguais. Além disso, o projeto dos ambientes deve levar em consideração uma ventilação efetiva, que independe das direções do vento, aberturas com portas, janelas etc. não obstruídas e usar áreas desiguais de aberturas de entrada e saída, a fim de proporcionar uma quantidade maior de ar por área total (OLIVEIRA, 2012).

A movimentação do ar no interior do ambiente deverá ser feita de modo que passe em torno dos equipamentos geradores de calor. As figuras 24 e 25 mostram as vistas superior e lateral, respectivamente, dos posicionamentos aceitáveis da entrada e saída de ar em ambientes com equipamentos geradores de calor (COSTA, 2014).

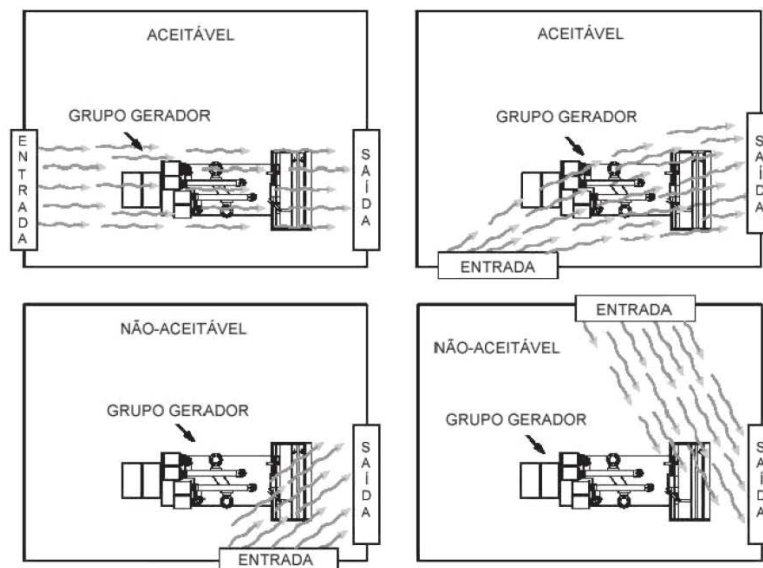


Figura 24 - Localização da entrada e saída do ar de ventilação (vista superior)  
Fonte: (COSTA, 2014, p. 66)

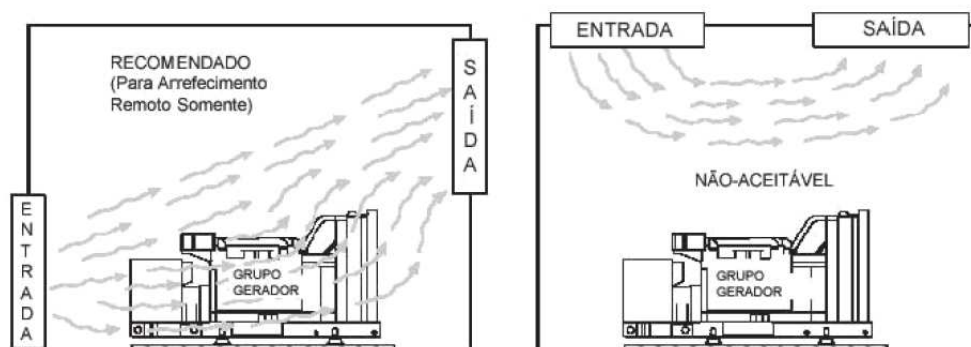


Figura 25 - Localização da entrada e saída do ar de ventilação (vista lateral)  
Fonte: (COSTA, 2014, p. 66)

A mesma parede não deve ser utilizada como entrada e saída da ventilação. Além disso, ar que foi utilizado na ventilação dos equipamentos dissipadores de calor deve ser expelido diretamente para fora, para que não seja mais um elemento de transferência de calor. O sistema deve ser criado considerando todas as portas de acesso fechadas, para não serem consideradas como entrada de ar (COSTA, 2014).

#### 2.4.2 Tipos de ventilação

Clezar e Nogueira (2009) mostram que a ventilação recebe a classificação de dois grandes grupos, a ventilação local exaustora (vle) e a ventilação geral diluidora (vdg). Na figura 26, é mostrado os dois tipos de ventilação.

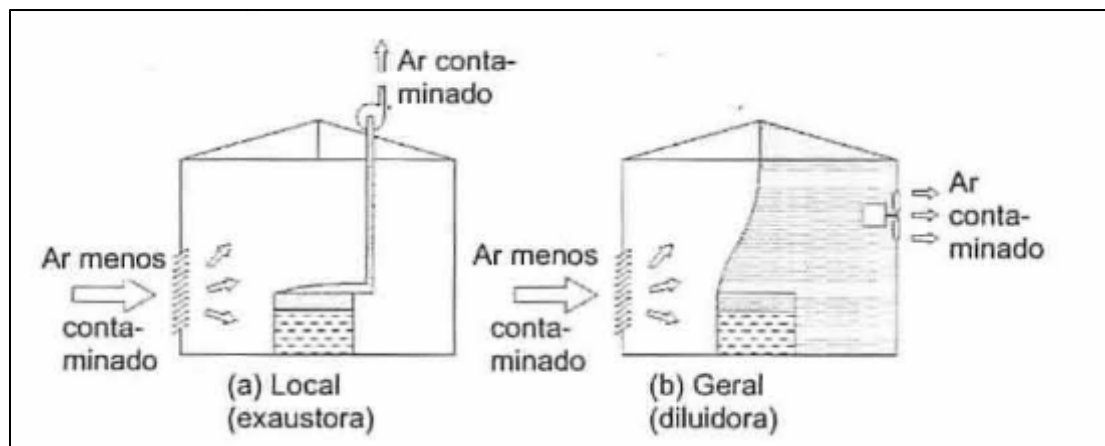


Figura 26 - Ventilação local e ventilação geral  
Fonte: (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009, p. 23)

Segundo Nogueira (2009), a ventilação local exaustora é realizada por meio de um dispositivo que faz a captação de ar junto a fonte poluidora. A ventilação geral diluidora possibilita, de um modo geral, a ventilação do ambiente.

#### 2.4.3 Ventilação exaustora

Acordando com Mesquita *et al.* (1988) a finalidade da ventilação local exaustora é a proteção da saúde do trabalhador, com a captação dos poluentes de uma certa fonte. Mas também a ventilação local exaustora retira uma porção do calor de convecção liberadas de uma fonte quente que possa existir no local.

De acordo com Mesquita *et al.* (1988) o sistema de ventilação exaustora é composto por pelo menos uma das peças a seguir: o captor, que é o ponto de entrada do ar a ser retirado pelo sistema, sistema de dutos, que tem o objetivo de transportar o ar retirado, o ventilador que fornece a energia de movimentação do ar com uma diferença de pressão entre o captor e a saída do sistema e também do equipamento de controle de poluição do ar, necessário para reter os poluentes e não contaminar o ambiente externo.

Mesquita *et al.* (1988) informa que o projeto de ventilação local exaustora precisa seguir os princípios da engenharia, com isso é preciso pensar na maior eficiência com o menor custo. Porém os objetivos da ventilação local exaustora devem ser o principal fator de projeto para esses sistemas.

#### 2.4.4 Ventilação geral ou insufladora

Um método disponível de controle das condições de um ambiente usando ventiladores é a ventilação geral. Um ventilador pode fazer a insuflação do ar no ambiente, pegando o ar externo, ou também pode fazer a exaustão do ar desse ambiente para o exterior. Exaustor é o nome do ventilador quando funciona no modo de exaustão do ar (OLIVEIRA, 2012).

O método da ventilação geral diluidora garante exaustão, insuflação, ou ambos, em um ambiente promovendo a redução da concentração de poluente e da temperatura. Essa redução é promovida porque há uma introdução de ar limpo e de menor temperatura no ambiente, fazendo que a concentração de poluentes seja menor e dispersada e quando a temperatura externa é menor que a interna, uma diminuição na temperatura do ambiente (OLIVEIRA, 2012).

Segundo Mesquita *et al.* (1988, p.121):

A ventilação geral é um dos métodos disponíveis para controle de um ambiente ocupacional; consiste na movimentação de quantidade relativamente grandes de ar através de espaços confinados, objetivando uma melhoria do ambiente pelo controle da temperatura, da umidade, da velocidade, da distribuição e da pureza do ar. Tal método pode fornecer também um make-up air e, se adequadamente dimensionado, recuperação e conservação de calor.

Conforme Mesquita *et al.* (1988), o propósito em que se destina a ventilação geral tem a classificação como ventilação geral para manutenção do conforto e eficiência do homem, pelo meio de restauração das condições do ar, dada alteração por refrigeração ou aquecimento do ar. Também é classificada como ventilação geral para manutenção da saúde e segurança do

homem, mediante o controle das quantidades de gases, vapores e particulados emitidas no local ocupado.

Consoante a Mesquita *et al.* (1988) a ventilação geral tem alguns métodos para seu fornecimento. Esses métodos são a insuflação e exaustão naturais, insuflação mecânica e exaustão natural, insuflação natural e exaustão mecânica e insuflação e exaustão mecânicas.

Para Mesquita *et al.* (1988) o equilíbrio térmico existe quando a quantidade de calor ganhada seja igual a quantidade de calor perdida.

#### 2.4.5 Ventilação geral diluidora (VGD) para remoção de calor sensível

Além da função de diminuir a concentração de contaminantes no ar no interior dos recintos, a ventilação geral diluidora também é usada para ventilar salas de transformadores, caldeiras e outros ambientes com grande geração de calor. Diante disso, o balanço energético é calculado para a determinação da vazão de ar a ser insuflada,  $Q_e$ , para somente a remoção de calor sensível. Na figura 27 é mostrado a base da troca térmica em regime permanente, apresentando a geração interna de calor, a geração de calor vinda do ambiente externo e a taxa de fluxo de massa que entra e sai do ambiente, saindo com um acréscimo de temperatura (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

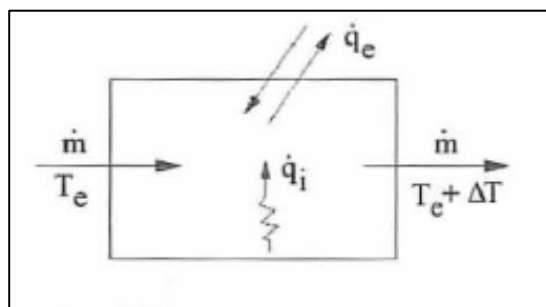


Figura 27 - VGD para remoção de calor sensível  
Fonte: (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009, p. 68)

Em que:

$$\dot{q}_T = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$\dot{q}_T = \dot{q}_e + \dot{q}_i \quad (7)$$

$$\dot{m} = (\rho \cdot Q)_e = (\rho \cdot Q)_s \quad (8)$$

Substituindo

$$Q_e = \frac{\dot{q}_T}{\rho_e \cdot c_p \cdot \Delta T} \quad (9)$$

Sendo:

- $Q_e$ : vazão de ar necessária, m<sup>3</sup>/s.
- $\dot{q}_T$ : Carga térmica total, W.
- $\dot{m}$ : taxa do fluxo de massa, kg/s.
- $\rho_e$ : massa específica do ar externo, kg/m<sup>3</sup>.
- $T_e$ : temperatura do ar externo, °C.
- $\Delta T$ : aumento de temperatura do ar, °C.
- $\dot{q}_i$ : geração interna de calor, W.
- $\dot{q}_e$ : quantidade de calor oriunda entre o ambiente interno externo, W.
- $c_p$ : calor específico do ar, J/(kg.°C).

#### 2.4.6 Ventilação mecânica (forçada)

Quando a admissão, circulação e extração de ar no interior do compartimento é feito por meio de recursos mecânicos, tem-se a chamada ventilação mecânica ou forçada. Esse tipo de ventilação implica no uso de motores elétricos, adicionando assim custos iniciais e permanentes com a energia elétrica e manutenção periódica. Em alguns casos, pode existir dispositivos de controle do sistema de ventilação (COSTA, 2014).

A fim de evitar a sucção de água da chuva para o interior dos locais onde se encontra o transformador as velocidades do ar devem ser limitadas entre 150 e 220 metros/min (2,5 e 3,6 metros/s). Essa característica deve ser considerada para a seleção dos ventiladores. As aberturas e entradas de ar devem conter proteções, do tipo persiana, para proteger a entrada de animais que possam ocasionar problemas nas instalações elétricas (COSTA, 2014).

Quando a ventilação natural não garante controle e eficiência da vazão de ar, temperatura e umidade, é necessário analisar configurações diferentes para suprir essas necessidades (MACINTYRE, 1990).

##### a) Insuflação mecânica e exaustão natural

Neste caso um ou mais ventiladores fazem o trabalho de enviar ar exterior para dentro do local de desejado. Isso faz com que a pressão no interior seja um pouco maior do que a



exterior, fazendo assim que o ar insuflado encontre as outras aberturas que existem no local, diminuindo a temperatura e a concentração de contaminante. Insuflar o ar mecanicamente faz com que se tenha maior controle da quantidade de ar e da pureza do ar que a ventilação natural, caso seja necessário o uso de filtros. Na figura 28 são mostradas alternativas para posicionamento do ventilador insuflador e das aberturas do recinto (MACINTYRE, 1990).

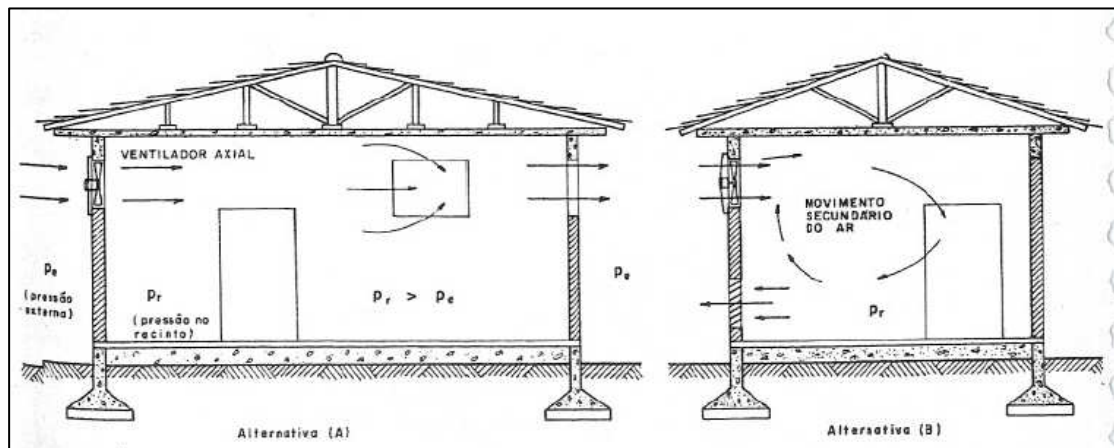


Figura 28 - Insuflação mecânica e exaustão natural  
Fonte: (MACINTYRE, 1990, p. 73)

#### b) Insuflação natural e exaustão mecânica

A remoção de ar dentro do recinto é feita com o auxílio de um ou mais ventiladores. A pressão interna diminui devido à exaustão, então um fluxo de ar é estabelecido pelas aberturas existentes, trazendo assim o ar exterior para dentro do local, com isso a pressão externa é maior que a interna. É uma solução mais barata do que a insuflação mecânica, porém sem tanto controle da qualidade do ar que entra no recinto. Essa configuração é usada em sanitários, cozinhas e ambientes com contaminantes de baixa toxicidade. Na figura 29 é mostrado um ambiente com dois ventiladores axiais para exaustão do ar (MACINTYRE, 1990).

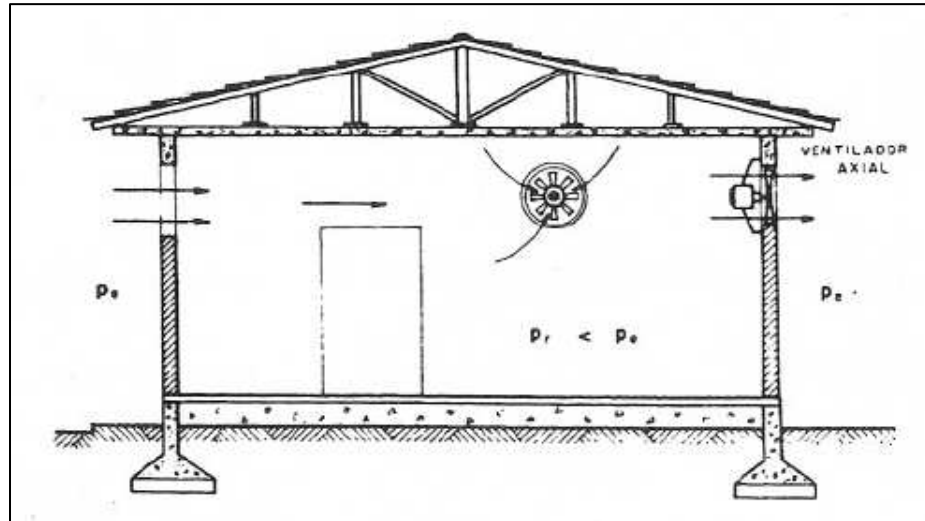


Figura 29 - Insuflação natural e exaustão mecânica  
 Fonte: (MACINTYRE, 1990, p. 74)

c) Insuflação e exaustão mecânica

Nesse sistema é colocado ventiladores que insuflam o ar e ventiladores que retiram o ar do ambiente. Isso garante maior controle da ventilação, garantindo a qualidade e a distribuição do ar no recinto de forma a suprir a necessidade. A figura 30 exemplifica a ventilação mista, a qual um ventilador faz insuflação do ar e um ventilador faz a exaustão do ar.

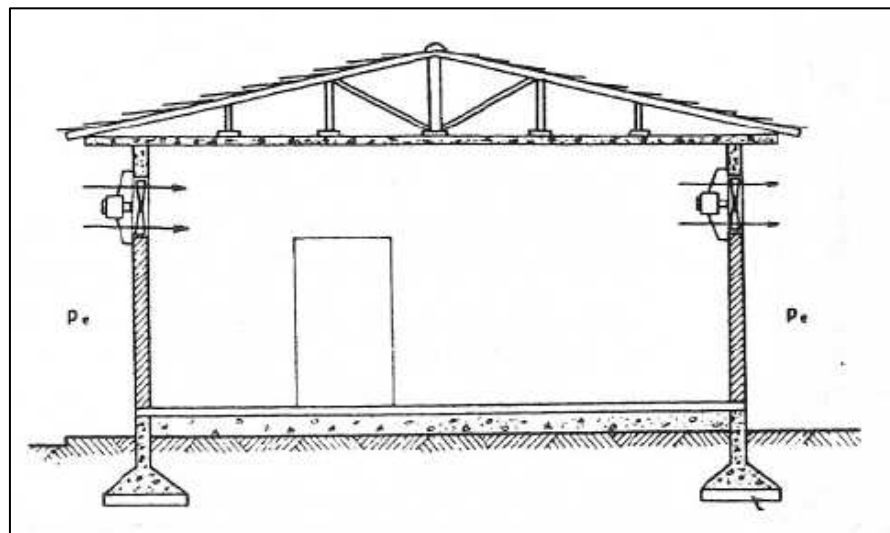


Figura 30 - Insuflação e exaustão mecânicas  
 Fonte: (MACINTYRE, 1990, p. 75)

### 2.4.7 Ventiladores

Os ventiladores são equipamentos responsáveis por fornecer energia ao ar, com o intuito de movimentá-lo, seja em um ambiente, seja em um sistema de dutos. O equipamento de ventilação deve fornecer uma pressão estática suficiente para vencer as perdas do sistema e gerar uma pressão cinética para manter a movimentação do ar, a fim de garantir a função básica de mover uma quantidade de ar no sistema de ventilação (OLIVEIRA, 2012).

É possível também que se use uma associação de ventiladores para garantir a vazão necessária e também por onde o fluxo de ar irá passar no ambiente, a fim de garantir as condições ideais estimadas. Os dois tipos de associação são:

- Em série: quando há uma ligação em série de ventiladores, a vazão de cada ventilador é mesma, mas as pressões totais são somadas.
- Em paralelo: quando existe uma ligação de ventiladores em paralelo, a pressão total proporcionada pelos ventiladores é única, mas suas vazões são somadas.

Em muitas aplicações se faz necessário uma vazão variável, sendo usado para esse controle a variação da rotação do ventilador ou o estrangulamento do fluxo de ar por registro na sucção, ou na descarga, do ventilador (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

A fim de proporcionar uma distribuição de ar adequada no ambiente é importante determinar as posições dos ventiladores garantindo que não tenha a estagnação do ar em regiões que devem ser ventiladas. Na figura 31 observa-se localizações adequadas e não adequadas para os ventiladores de exaustão e insuflação (MACINTYRE, 1990).

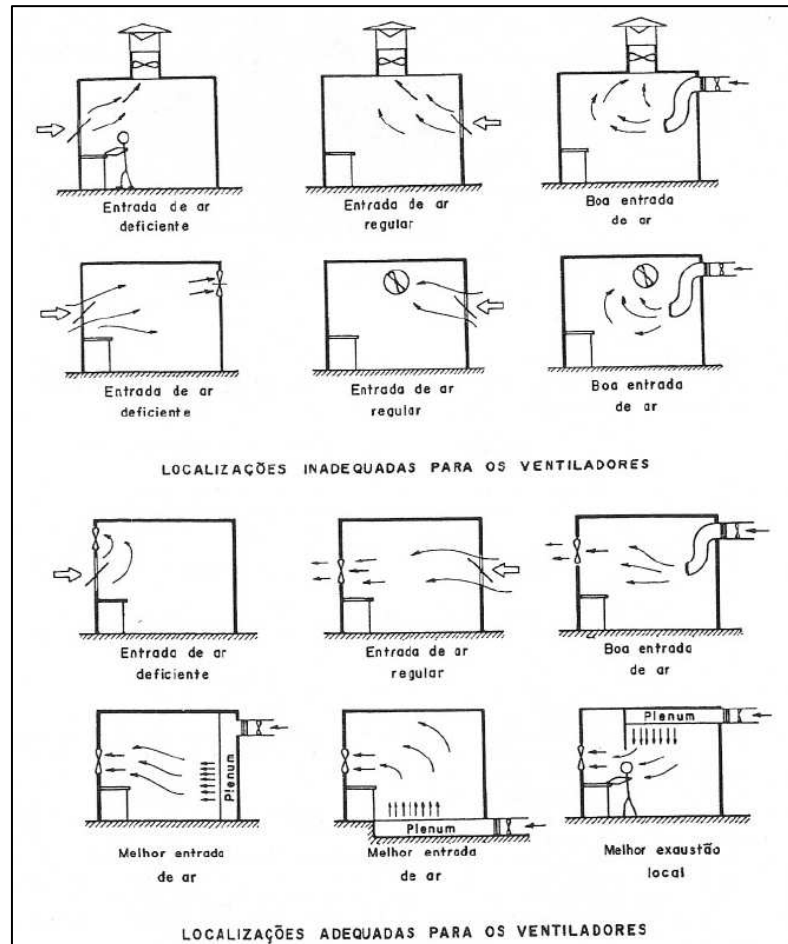


Figura 31 - Indicação quanto à localização dos ventiladores, para ventilação diluidora  
 Fonte: (MACINTYRE, 1990, p. 76)

Os ventiladores axiais e centrífugos são os dois tipos básicos de ventilador. Na figura 32 é mostrado um exemplo dos dois tipos.



Figura 32 - Ventilador axial e centrífugo  
 Fonte: (OLIVEIRA, 2012, p. 26)

### 2.4.8 Ventiladores axiais

O ventilador axial é formado por uma hélice criada em uma armação de controle de fluxo, suportes apoiam o motor usualmente presos a estrutura da armação. Esse tipo de ventilador é desenvolvido para fazer a movimentação do ar em espaços fechados com pressões estáticas relativamente baixas. O tipo de hélice e armação tem grande influência no desempenho e eficiência do ventilador. A figura 33 exemplifica alguns tipos de ventiladores do tipo axial (OLIVEIRA, 2012).

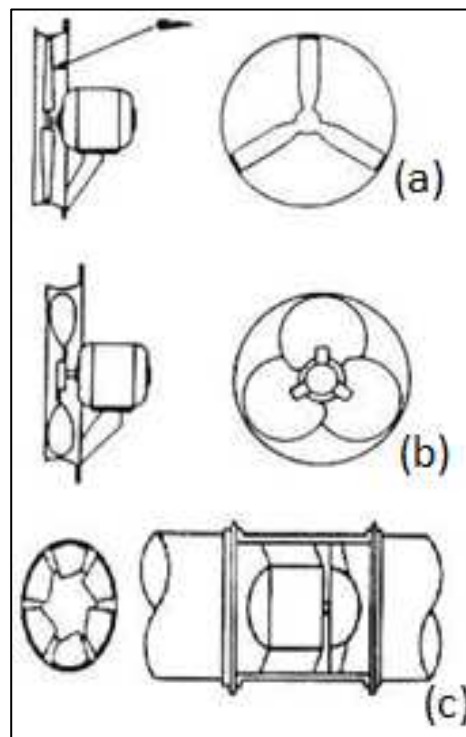


Figura 33 - (a) axial propulsor, (b) axial comum e (c) turbo-axial  
Fonte: (OLIVEIRA, 2012, p. 27)

- a) Axial propulsor: utilizado normalmente para circulação de ar ambiente. Move grandes volumes de ar, em baixas pressões, e tem baixo custo (OLIVEIRA, 2012).
- b) Axial comum: usado em minas subterrâneas e em indústrias. A forma das pás não deve ser utilizada em ambientes que tem alto risco de erosão e corrosão. Move o ar em pressões mais elevadas pois possui ampla calota central (OLIVEIRA, 2012).
- c) Turbo axial: colocado dentro de dutos, o que permite a conexão com tubos e tem pás mais grossas e largas (OLIVEIRA, 2012).

### 2.4.9 Ventiladores centrífugos

A constituição de ventiladores centrífugos é feita com o conjunto de um rotor, uma carcaça de conversão de pressão e um motor. Nesse equipamento o ar entra no centro do rotor e sofre movimentação acelerada pelas palhetas ganhando a impulsão pela periferia do rotor até a abertura de descarga. A figura 34 mostra os tipos de pás em ventiladores centrífugos (OLIVEIRA, 2012).

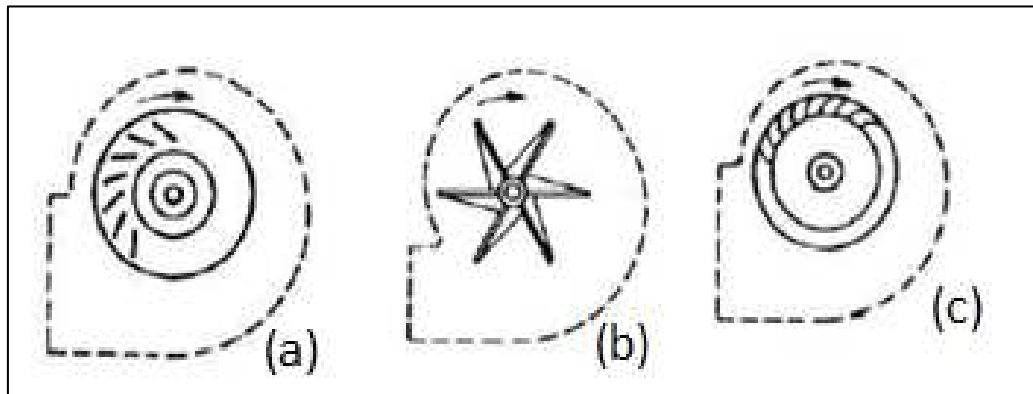


Figura 34 - (a) Centrífugo de pás para trás, (b) centrífugo de pás radiais e (c) centrífugo de pás para frente

Fonte: (OLIVEIRA, 2012, p. 29)

- a) Centrífugo de pás para trás: tem auto limitação da potência e alta eficiência, além de ser silencioso trabalhando em um ponto adequado (OLIVEIRA, 2012).
- b) Centrífugo de pás radiais: ventilador de alta robustez, usado na movimentação de efluentes com grande carga de poeira, poeira pegajosa e corrosiva. Porém, tem alto ruído e baixa eficiência (OLIVEIRA, 2012).
- c) Centrífugo de pás para frente: maior capacidade de exaustão em baixa velocidade, não indicado para trabalhos de alta pressão e nem cargas de poeira elevada, frequentemente apresenta corrosão com utilização inadequada (OLIVEIRA, 2012).

### 2.4.10 Grandezas características do ventilador

Os ventiladores são equipamentos mecânicos para a conversão de energia mecânica de rotação, fornecida em seus eixos, em pressão de ar. O deslocamento do volume de ar por unidade de tempo é a vazão do ventilador ( $Q$ ). A PTV (pressão total do ventilador) é a diferença de pressão entre a saída e a entrada do ventilador. A velocidade média do ar na saída do ventilador proporciona a PVV (pressão de velocidade do ventilador). E a PEV (pressão estática

do ventilador é a diferença entre a PTV e a PVV. Como segue as equações. (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009)

$$PEV = PTV - PVV \quad (10)$$

$$PTV = Pt_{saída} + Pt_{entrada} \quad (11)$$

$$PTV = Pe_{saída} + PVV - Pt_{entrada} \quad (12)$$

Substituindo as equações

$$PEV = Pe_{saída} - Pt_{entrada} \quad (13)$$

A potência no eixo do ventilador é obtida pela equação

$$P_{eixo} = \frac{Q \cdot PTV}{\eta_{vt}} \quad (14)$$

Ou

$$P_{eixo} = \frac{Q \cdot PEV}{\eta_{ve}} \quad (15)$$

Sendo:

- $P_{eixo}$ : potência no eixo, W.
- Q: vazão, m<sup>3</sup>/s.
- PTV: pressão total do ventilador, Pa.
- PEV: pressão estática do ventilador, Pa.
- $\eta_t$ : eficiência total do ventilador.
- $\eta_{te}$ : eficiência estática do ventilador.

## 2.5 Carga térmica

A soma de todas as formas de calor existentes dentro de um recinto é a chamada carga térmica. O cálculo da carga térmica em um recinto leva em consideração os ganhos e perdas por trocas térmicas em diversas superfícies, como as paredes e coberturas do edifício, portas, janelas e também as parcelas de calor oriundas de pessoas, lâmpadas e equipamentos (BORRÉ, 2013).

Macintyre (1990) mostra que para proporcionar uma temperatura adequada para o ambiente, por meio da ventilação geral diluidora, é necessário que os ventiladores forneçam uma vazão de ar adequada. Essa vazão de ar é calculada de acordo com a carga térmica gerada devido as características do ambiente e a diferença de temperatura no interior e exterior do recinto. Esse calor gerado vem de algumas fontes, como:

- Irradiação solar sobre paredes externas e coberturas;
- Condução pelas paredes, pisos, tetos, vidros etc.;
- Dissipação de calor pelos equipamentos que estão no interior (motores, transformadores, iluminação, etc.).

### 2.5.1 Carga térmica devido a insolação

A energia solar é a maior energia que a superfície da Terra recebe do universo, a qual o ser humano aproveita como fonte térmica. Essa energia, na maioria dos casos, é responsável por parcela significativa de carga térmica nos cálculos de refrigeração de ambientes. A absorção da energia solar nas superfícies é de acordo com as características da mesma, e pode ser maior ou menor de acordo com a reflexão proporcionada (CREDER, 2004).

Segundo Borré (2013), a intensidade da radiação incidente e as propriedades térmicas das superfícies externas do edifício irão determinar o ganho de calor. Os fatores que fornecem a variação da insolação, são:

- Tipo de superfície;
- Tipo de material da superfície;
- Área útil;
- Orientação solar;
- Sombreamento;
- Estação do ano.

Os elementos os quais compõem as edificações, quando estão sobre a incidência de raios solares, diretos ou difusos, podem ter a classificação como opacos e transparentes. Nos materiais opacos a radiação é absorvida e refletida dependendo da sua característica. Assim, a refletividade e a absorvidade são as características que determinam as proporções de energia refletida e absorvida, respectivamente (FROTA; SCHIFFER, 2001).



O cálculo para o ganho de calor pela radiação solar é dado pela equação:

$$\phi = U \cdot A \cdot (T_{SOL-AR} - \theta_i) \quad (16)$$

Sendo:

- $\phi$ : ganho de calor pela radiação solar (W).
- $A$ : área da superfície externa (m<sup>2</sup>).
- $\theta_i$ : temperatura interna (K).
- $U$ : transmitância térmica (W/m<sup>2</sup>.K).

Tsol-ar representa a temperatura da combinação do efeito da radiação solar incidente e a convecção e radiação que ocorre entre o meio externo e essa superfície. Nesse caso o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) e a emissividade ( $\epsilon$ ) do material fazem intervenção das características. A equação, para planos horizontais (coberturas), da carga térmica gerada fica:

$$\phi = U \cdot A \cdot (\theta_e + \alpha \cdot RS \cdot R_{se} - 4 - \theta_i) \quad (17)$$

Sendo:

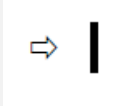


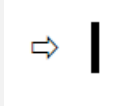


- $\phi$ : fluxo de calor (W).
- $R_{se}$ : resistência superficial externa ((m<sup>2</sup>.K)/W).
- $RS$ : radiação solar (W/m<sup>2</sup>).

Para planos verticais, a equação do fluxo de calor fica:

$$\phi = U \cdot A \cdot (\theta_e + \alpha \cdot RS \cdot R_{se} - \theta_i) \quad (18)$$

Os valores da resistência superficial externa podem ser conferidos na tabela 2.

Tabela 2 - Resistência térmica superficial interna e externa

$R_{si}(m^2 \cdot K)/W$			$R_{se}(m^2 \cdot K)/W$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 7)

Outra característica térmica necessária para os cálculos é a absorvidade ( $\alpha$ ) que as superfícies dos materiais apresentam. A tabela 3 mostra alguns valores em superfícies comumente usadas e também mostra a emissividade ( $\epsilon$ ).

Tabela 3 - Absorvidade ( $\alpha$ ) (ondas curtas) e emissividade ( $\epsilon$ ) para alguns tipos de superfície

<b>Tipo de superfície</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\epsilon</math></b>
<b>Chapa de alumínio (nova e brilhante)</b>	0,05	0,05
<b>Chapa de alumínio (oxidada)</b>	0,15	0,12
<b>Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)</b>	0,25	0,25
<b>Caição nova</b>	0,12 / 0,15	0,9
<b>Concreto aparente</b>	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
<b>Telha de barro</b>	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
<b>Tijolo aparente</b>	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
<b>Reboco claro</b>	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
<b>Revestimento asfáltico</b>	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
<b>Vidro incolor</b>	0,06 / 0,25	0,84
<b>Vidro colorido</b>	0,40 / 0,80	0,84
<b>Vidro metalizado</b>	0,35 / 0,80	0,15 / 0,84
<b>Pintura:</b>		
<b>Branca</b>	0,20	0,90
<b>Amarela</b>	0,30	0,90
<b>Verde clara</b>	0,40	0,90
<b>“Alumínio”</b>	0,40	0,50
<b>Verde escura</b>	0,70	0,90
<b>Vermelha</b>	0,74	0,90
<b>Preta</b>	0,97	0,90

Fonte: (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 8)

A resistência térmica ( $R$ ) e a transmitância térmica/coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ), que é o fluxo de calor transmitido por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura, pode ser calculada, a partir da condutividade térmica, que é a habilidade do material em conduzir energia térmica, por unidade de espessura. E também pode ser encontrada em catálogo de fabricantes ou em estudos feitos em diversos materiais. A equação da resistência e da transmitância é dado por:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (19)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad (20)$$

Sendo:

- R: resistência térmica ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ).
- e: espessura ( $m$ ).
- $\lambda$ : condutividade térmica ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ ).
- U: transmitância térmica ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

Cada tipo de material apresenta propriedades distintas como a condutividade térmica ( $\lambda$ ), massa específica ou densidade ( $\rho$ ) e calor específico ( $c$ ). Na figura 35 são apresentados alguns valores dessas características para diferentes materiais.

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
<b>Impermeabilizantes</b>			
membranas betuminosas	1000-1100	0,23	1,46
asfalto	1600	0,43	0,92
asfalto	2300	1,15	0,92
betume asfáltico	1000	0,17	1,46
<b>Isolantes térmicos</b>			
lã de rocha	20-200	0,045	0,75
lã de vidro	10-100	0,045	0,70
poliestireno expandido moldado	15-35	0,040	1,42
poliestireno estrudado	25-40	0,035	1,42
espuma rígida de poliuretano	30-40	0,030	1,67
<b>Madeiras e derivados</b>			
madeiras com densidade de massa aparente elevada	800-1000	0,29	1,34
carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus	600-750	0,23	1,34
	450-600	0,15	1,34
	300-450	0,12	1,34
aglomerado de fibras de madeira (denso)	850-1000	0,20	2,30
aglomerado de fibras de madeira (leve)	200-250	0,058	2,30
aglomerado de partículas de madeira	650-750	0,17	2,30
	550-650	0,14	
placas prensadas	450-550	0,12	2,30
	350-450	0,10	2,30
placas extrudadas	550-650	0,16	2,30
compensado	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica	450-550	0,15	2,30
	350-450	0,12	2,30
	250-350	0,10	2,30
palha (capim Santa Fé)	200	0,12	
<b>Metais</b>			
aço, ferro fundido	7800	55	0,46
alumínio	2700	230	0,88
cobre	8900	380	0,38
zinco	7100	112	0,38
<b>Pedras (incluindo junta de assentamento)</b>			
granito, gneisse	2300-2900	3,00	0,84
ardósia, xisto	2000-2800	2,20	0,84
basalto	2700-3000	1,60	0,84
calcários/mármore	> 2600	2,90	0,84
outras	2300-2600	2,40	0,84
	1900-2300	1,40	0,84
	1500-1900	1,00	0,84
	< 1500	0,85	0,84
<b>Plásticos</b>			
borrachas sintéticas, poliamidas, poliésteres, polietilenos	900-1700	0,40	
polimetacrílicos de metila (acrílicos) policloreto de vinila (PVC)	1200-1400	0,20	
<b>Vidro</b>			
vidro comum	2500	1,00	0,84

Figura 35 - Materiais e sua condutividade térmica ( $\lambda$ ), densidade específica ( $\rho$ ) e calor específico (c)

Fonte: (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 10)

### 2.5.2 Carga térmica devido a equipamentos

Os equipamentos, em geral, apresentam perdas em sua eficiência devido a perdas por atrito em partes mecânicas, perdas em enrolamentos de equipamentos elétricos, dentre outras que são reveladas a partir de suas características. Os equipamentos apresentam rendimentos, os quais mostram a quantidade de energia que está sendo usada por eles (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

Com isso, a equação da carga térmica gerada por equipamentos é:

$$q_{\text{equipamento}} = (1 - \eta) * P \quad (21)$$

Sendo:

- $q$ : carga térmica, ( $W$ );
- $\eta$ : rendimento do equipamento;
- $P$ : potência aplicada no equipamento ( $W$ ).

## 2.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo são mostradas as informações sobre o setor de energia elétrica, a base teórica envolvendo os transformadores, ventilação e carga térmica. A revisão bibliográfica apresentada faz-se necessária para o estudo deste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado as características do desenvolvimento da pesquisa, com o intuito de apresentar a sua natureza e classificação, a área de pesquisa, métodos e materiais para coleta de dados usados como variáveis e indicadores optados, para que seja possível realizar os cálculos e análises necessárias.

#### 3.1 Tipo de pesquisa

Para Gil (2002), o processo lógico e ordenado que tem como propósito conceder respostas aos problemas que surgem, é conhecido como pesquisa. A pesquisa surge quando não é possível obter a resposta com as informações disponíveis, ou as informações não estão presentes de forma ordenada para responder o problema proposto.

Consoante com Ander-Egg (1978, *apud* Marconi e Lakatos, 2003), a pesquisa é ação reflexiva ordenada, crítica e controlada, a qual concede o descobrimento de fatos ou dados inéditos, relações ou leis, em qualquer área de conhecimento.

Minayo *et al.* (2002), propõem que a pesquisa se divide em duas formas de realização, a qualitativa e quantitativa. O modelo qualitativo tem como base a interpretação, que está centralizado na teoria e em técnicas empregadas para gerar uma situação real. Buscando atributos e meios que não são de fácil descrição numérica. A descrição, observação e gravação são as formas de coleta de dados.

A pesquisa quantitativa é uma espécie de informação que pode ser apresentada numericamente por métodos estatísticos, opiniões e elementos obtidos em pesquisa de campo. Traduz em número opiniões e informações, a fim de classificá-las e analisá-las (SILVA; MENEZES, 2005).

Gil (2002) mostra a classificação do objetivo da pesquisa como exploratória, descritiva e explicativa. Na pesquisa exploratória o intuito é esclarecer, modificar e desenvolver princípios e conceitos, mostrando indagações que podem ser pesquisas em outro momento, envolvendo investigação bibliográfica, de documentos, entrevistas e estudo de caso. Proporcionando assim uma visão geral de algum fato. A pesquisa descritiva é observada, analisada e descrita através de coleta de dados e as características de algum fenômeno, população ou relação entre variáveis. E por fim, a pesquisa explicativa tem o objetivo de identificar a contribuição ou determinação de fatores que influenciam nos fenômenos, mostrando o aprofundamento do conhecimento com a realidade, já que esclarece as razões e porquê das coisas.

Gil (2002) apresenta os procedimentos técnicos como a pesquisa bibliográfica, experimental, documental, pesquisa-ação, e estudo de caso.

De acordo com Silva e Menezes (2005), a utilização de livros e trabalhos acadêmicos, sejam impressas ou digitais são a base para a pesquisa bibliográfica, além de dados obtidos por meio de experimentos e estudos de caso.

A pesquisa experimental está mais perto das ciências da natureza, onde está apresenta grande responsabilidade pelos maiores avanços do meio científico, através do manuseio de variáveis controladas para a observação, exame e interpretação das respostas do foco de pesquisa, utilizando equipamentos e técnicas necessárias (MINAYO *et al.*, 2002).

Consoante com Assis (2018), a pesquisa documental não tem tratamento analítico, sendo feita por diversas fontes. O envolvimento e identificação do pesquisador com o indivíduo que está sendo investigado é característica da pesquisa participante.

Segundo Gil (2002), a pesquisa-ação é produzida a partir de conhecimentos empíricos, onde os pesquisadores e participantes de modo cooperativo e participativo, fazem a associação com uma ação ou resolução.

O estudo de caso, descrito por Yin (2001), é composto por um estudo acurado e detalhado de um ou mais objeto de forma a permitir um conhecimento maior e detalhado, com a coerência do planejamento, coleta e da análise de dados.

O trabalho exposto se classifica com uma pesquisa quantitativa, porque realiza cálculos com dados numéricos, mas também se classifica com qualitativo por apresentar discussões de avaliação que não podem ser numericamente expressadas. Em acordo com a pesquisa bibliográfica para o desenvolvimento teórico. Tem como característica, uma pesquisa exploratória, e um estudo de caso, já que é feito a análise da ventilação em um transformador em local confinado, mostrando o impacto em sua eficiência.

### **3.2 Materiais e Métodos**

Neste trabalho é realizado um estudo bibliográfico com o intuito de apresentar os conceitos sobre energia elétrica, transformadores e ventilação. Com essas informações é feito um cálculo analítico das cargas térmicas e dos valores para dimensionamento do sistema de ventilação.

Baseado no estudo analítico, os dados obtidos serão tabulados no *software* EXCEL. Com os elementos contidos na tabulação é feita uma seleção de equipamentos e o dimensionamento do sistema de ventilação. A figura 36 mostra como é feita a pesquisa.

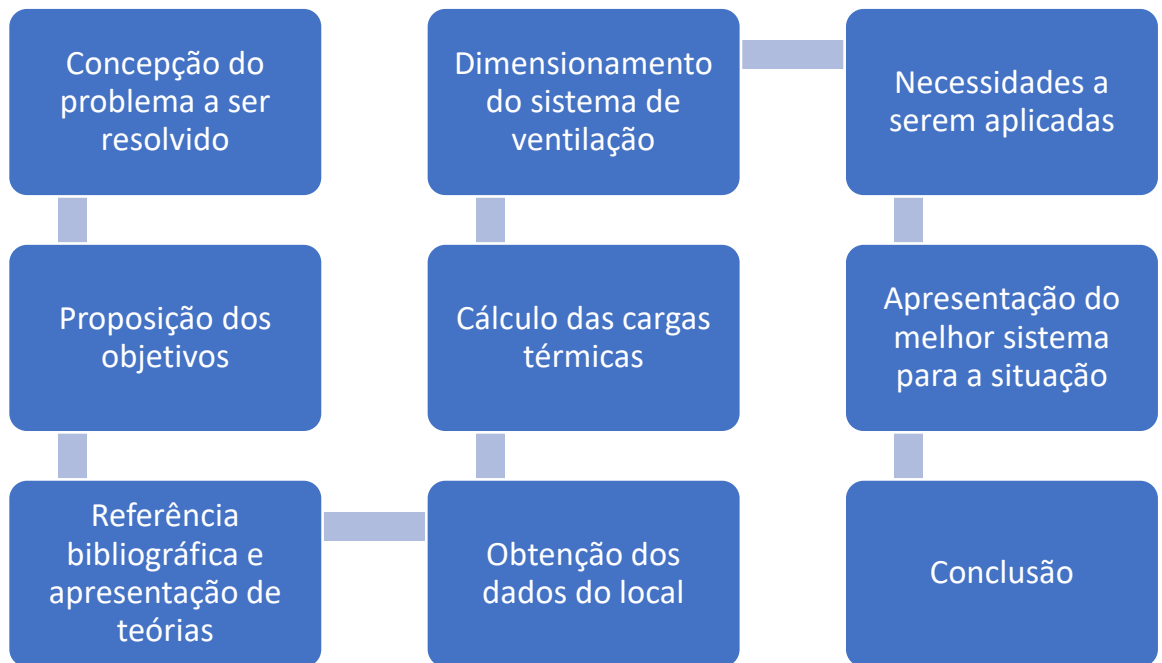


Figura 36 - Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa  
Fonte: Pesquisa direta, 2021.

O fluxograma apresentado na figura 36 mostra o caminho feito para realizar o trabalho. Primeiramente é definido qual é o problema a ser resolvido, com a apresentação do estudo de caso. Depois é determinado os objetivos para a realização do trabalho. Posteriormente é feito uma pesquisa em relação ao tema e objetos de estudo, apresentando um material teórico sobre o assunto. Para a realização do trabalho é necessário a coleta de dados do local onde o estudo é feito e realizar os cálculos de carga térmica para o dimensionamento do sistema de ventilação. Com o dimensionamento, é necessário aplicar o sistema de forma suprir as necessidades de posicionamento e cuidados do sistema de ventilação. E por fim é apresentado uma conclusão do estudo de caso.

Apresentada no capítulo 2, a revisão bibliográfica mostra as utilizações de energia elétrica no Brasil e no mundo, definição de transformador e sua necessidade, tipos de ventilação e seus equacionamentos. Será feito um estudo analítico, os dados obtidos serão tabulados e posteriormente analisados e será feita a seleção do melhor sistema.



### 3.3 Instrumento de coleta de dados

Esta etapa consiste em obter a base necessária para a pesquisa por meio da revisão bibliográfica, observação e de experimentos para a coleta de dados necessária para a realização da pesquisa.

A pesquisa é de natureza bibliográfica, quantitativa, e exploratória, então os dados a serem estudados serão adquiridos por meio de uma pesquisa bibliográfica, com a utilização de livros, artigos, dissertações e informações na internet.

### 3.4 Variáveis e indicadores

Gil (2002) mostra que uma variável é algo que pode receber classificação em duas ou mais categorias. É uma quantidade que varia, uma classificação ou medida, concepção que mostra ou contém valores, aspecto, fator ou propriedade, indicado em material de estudo e de possível avaliação.

Para a aferição e aprendizado de cada variável, interessam alguns indicadores que são escolhidos de acordo com a pesquisa e seus objetivos, recebendo a classificação de quantitativa e qualitativa. As variáveis e indicadores são separados de acordo com as definições e objetivos do estudo. A tabela 4 apresenta as variáveis e seus indicadores abordados nesta pesquisa.

Tabela 4 - Tabela de indicadores e variáveis

<b>Variáveis</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Carga Térmica</b>	Perdas no transformador
	Perdas nos inversores
	Insolação
	Temperatura interna e externa
<b>Ventilação</b>	Vazão de ar
	Temperatura externa
	Equipamentos

Fonte: Pesquisa direta (2021)

### **3.5 Tabulação de dados**

Esta etapa está caracterizada por coletar os dados da teoria e os dados do estudo de caso. Assim os cálculos são realizados de acordo com as informações coletadas. Esses dados são postos em uma tabela, no *software* EXCEL com intuito de facilitar a avaliação e análise dos dados obtidos.

### **3.6 Considerações finais**

O presente capítulo mostrou os tipos de pesquisa, apresentando instrumentos e técnicas usadas para fazer esse trabalho. Foi abordado também os métodos e materiais usados para executar a pesquisa. Também foi apresentada a delimitação da área onde se passa a pesquisa e a forma de coleta e tabulação dos dados conseguidos.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, de acordo com o cálculo analítico e, também mostrar as maneiras adotadas para realização dos cálculos e por fim análise e comparação dos resultados obtidos.

## 4 RESULTADOS

O presente capítulo mostra os cálculos realizados e os resultados obtidos para o dimensionamento de um sistema de ventilação para uma subestação que contém um transformador a óleo e inversores que atendem uma usina solar fotovoltaica. Equipamentos são selecionados para garantir a ventilação adequada.

### 4.1 Estudo de caso

Uma empresa do setor de energia solar precisa de um sistema de ventilação para uma subestação que contém um transformador e inversores em seu interior. A figura 37 mostra o desenho dessa subestação e a disposição dos equipamentos dentro dela. Essa subestação fica em Belo Horizonte, em um local onde não há sombreamento incidente sobre a mesma.

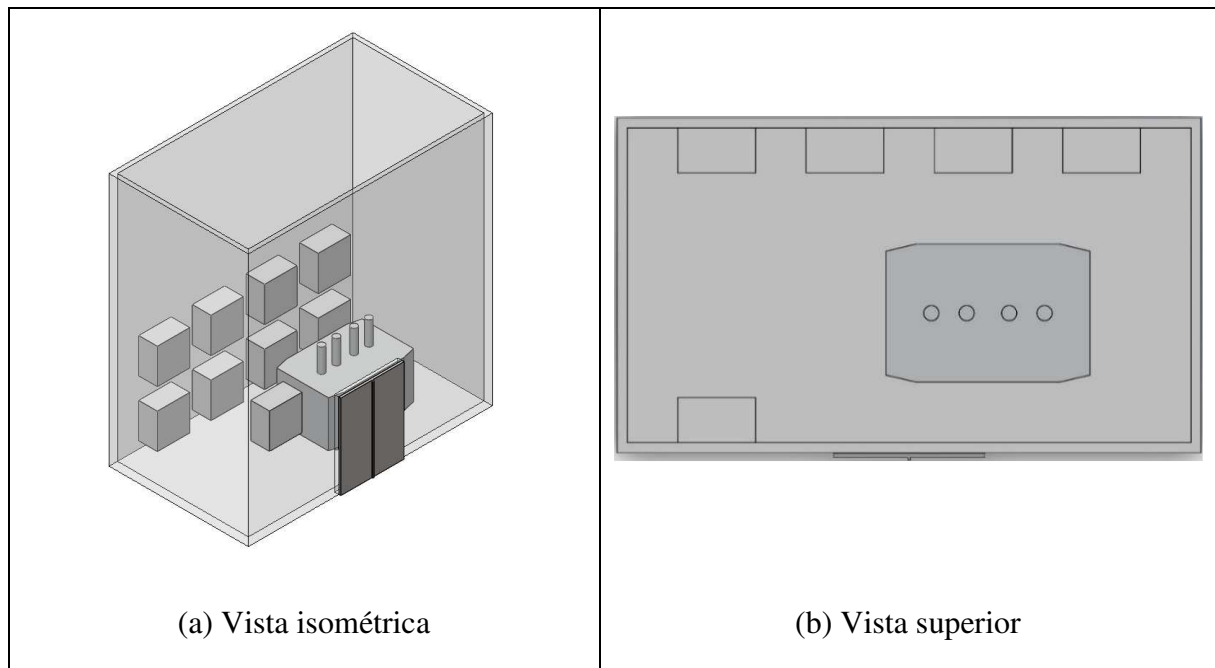


Figura 37 - Desenho da subestação (a) vista isométrica e (b) vista superior  
Fonte: Pesquisa direta, 2021

A empresa apresentou um projeto de uma usina solar de 1MW. O engenheiro electricista informou o gráfico, apresentado na figura 38, que mostra a aplicação de potência, durante o dia, no transformador que será usado.

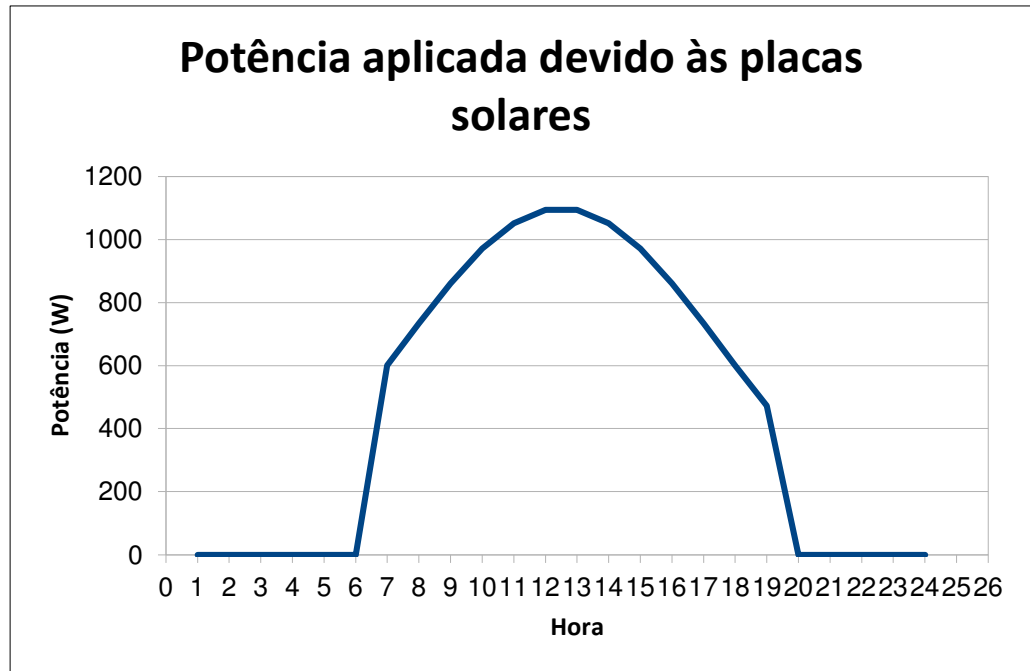


Figura 38 - Potência aplicada devido as placas solares  
 Fonte: Empresa X (2020)

Essa potência originada das placas solares é aplicada em 9 módulos inversores 6060 FV Canadian CS – 330W, e depois é aplicada a um transformador a óleo de capacidade 1000 kVA, do tipo ONAN, como o da figura 39, afim de ser distribuída aos locais necessários.



Figura 39 - Transformador Óleo 1000.0kVA 13.8/0.22kV CST ONAN  
 Fonte: (WEG, 2021a)

A empresa optou em construir uma subestação de alvenaria para proteger o transformador e os inversores. Devido a geração térmica dos equipamentos dentro da

subestação e a radiação solar é necessária ventilação no local de instalação do transformador afim de garantir temperaturas seguras para os equipamentos. Com isso, surge o estudo da ventilação.

#### 4.1.1 Características da cidade

A cidade onde é instalada a usina solar é Belo Horizonte, a qual tem a latitude de  $19,82^\circ$  Sul e longitude  $43,95^\circ$  Oeste. Segundo dados do Cresesb (Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito, 2020) a capital mineira recebeu a irradiação solar média mensal de acordo com o gráfico da figura 40.

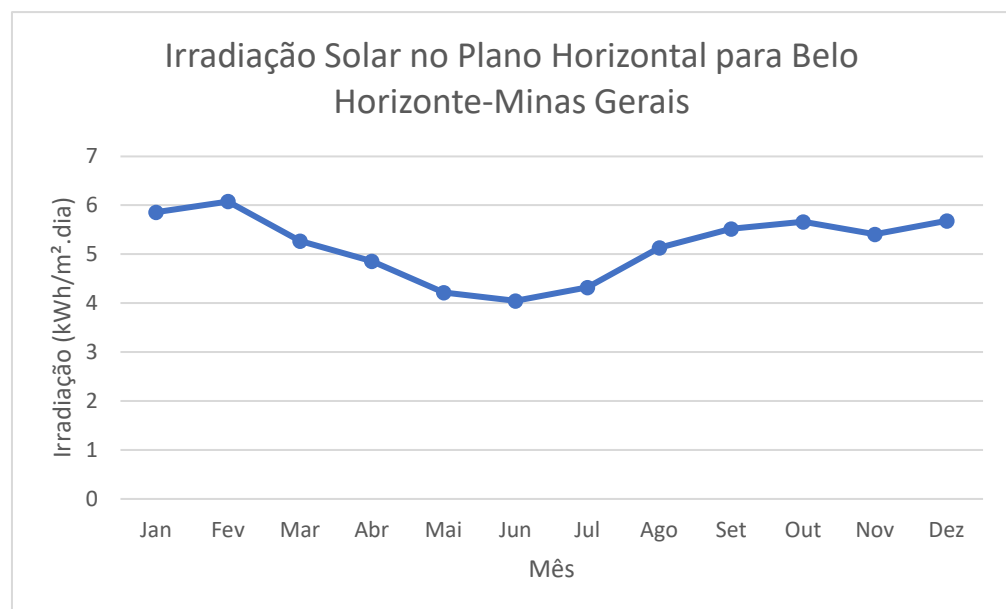


Figura 40 - Irradiação Solar no Plano Horizontal para Belo Horizonte  
Fonte: (CRESESB, 2020)

Observa-se que fevereiro foi o mês de maior irradiação e com a temperatura máxima média maior. Utilizando o *software* Radiasol e seu banco de dados para Belo Horizonte observou-se que no dia 16 de fevereiro ocorreu a maior radiação solar do ano. A figura 41 mostra a interface inicial do *software*, onde se entra com a localidade desejada.

**Selecione um país e uma estação**

**País**: Brazil

**Estação**: Belo Horizonte

**Latitude**: 19,93    **N/S**: S    **Longitude**: 43,93    **E/W**: W

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
4,28	5,56	4,06	4,28	3,69	3,72	3,97	4,36	4,69	4,44	4,81	4,33

**Radiação em kWh/m<sup>2</sup>**

Figura 41 - *Software Radiasol*  
 Fonte: Pesquisa direta, 2021

A figura 42 apresenta a interface do *software* onde se escolhe o ângulo de inclinação da superfície e em qual orientação essa superfície está localizada.

RADIASOL

Arquivo Opções Copiar Estocásticos Menu ?

**Ângulo de Inclinação**: 0

**Desvio Azimutal do Norte**: 0

**Hora Solar para Superfície Horizontal**  
 Nascer do Sol: 5h42min    Pôr-do-Sol: 18h18min  
 Duração do Dia: 12h36min

**Hora Solar para Superfície Inclinada**  
 Nascer do Sol: 5h41min    Pôr-do-Sol: 18h18min  
 Duração do Dia: 12h36min

**Radiação total do dia em kWh/m<sup>2</sup>**  
 Sup. Horizontal Terrestre: 5,56    Sup. Inclinada Terrestre: 5,55  
 Extraterr. Kt: 11,1    Extraterr. Kt: 11,1

**Brasil**    Lon: 43,93 W    **Belo Horizonte**    Lat: 19,93 S

	FEV	Direta	Dfusa	Albedo	cos(0)	cos(0z)
4:30	0	0	0	0	0	0
5:30	0	0	0	0	0	0
6:30	102	13	89	0	0,1942	0,1942
7:30	253	51	203	0	0,4255	0,4255
8:30	416	117	299	0	0,6329	0,6329
9:30	569	202	366	0	0,8023	0,8023
10:30	686	282	404	0	0,922	0,922
11:30	751	331	420	0	0,984	0,984
12:30	751	331	420	0	0,984	0,984
13:30	686	282	404	0	0,922	0,922
14:30	569	202	366	0	0,8023	0,8023
15:30	416	117	299	0	0,6329	0,6329
16:30	253	51	203	0	0,4255	0,4255
17:30	102	13	89	0	0,1942	0,1942
18:30	0	0	0	0	0	0

DATA: 16/02

Laboratório de Energia Solar  
 GESTE - PROMEC - UFRGS

Figura 42 - Inserção de dados no *software Radiasol*  
 Fonte: Pesquisa direta, 2021

Foram extraídas as informações sobre radiação dos planos verticais norte, sul, leste e oeste e também do plano horizontal. A tabela 5 mostra as radiações de cada plano por hora do dia 16 de fevereiro.

Tabela 5 - Radiação solar em W/m<sup>2</sup> por hora no dia 16 de fevereiro em Belo Horizonte

<b>Hora</b>	<b>Plano horizontal</b>	<b>Plano vertical norte</b>	<b>Plano vertical sul</b>	<b>Plano vertical oeste</b>	<b>Plano vertical leste</b>
6	102	51	62	124	60
7	253	114	123	241	133
8	416	166	166	326	182
9	569	217	202	358	209
10	686	255	224	339	225
11	751	276	234	277	234
12	751	276	234	234	277
13	686	255	224	225	339
14	569	217	202	209	358
15	416	166	166	182	326
16	253	114	123	133	241
17	102	51	62	60	124

Fonte: Radiasol (2020)

Segundo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, 2020) Belo Horizonte apresentou os seguintes dados meteorológicos de 1931 até 2020, mostrados na figura 43.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima recorde (°C)	35,4	35,2	33,9	32,8	32,9	30,5	32	34	36,6	37,4	36	34,8	37,4
Temperatura máxima média (°C)	28,4	29	28,5	27,7	25,8	24,8	24,7	26,1	27,4	28,1	27,7	27,8	27,2
Temperatura média compensada (°C)	23,4	23,8	23,4	22,5	20,5	19,3	19,1	20,3	21,6	22,6	22,7	22,9	21,8
Temperatura mínima média (°C)	19,8	19,9	19,7	18,6	16,4	15	14,7	15,7	17,1	18,5	18,9	19,4	17,8
Temperatura mínima recorde (°C)	10,4	10	11,7	8,4	7,4	3,1	5,4	6,2	8,8	9,4	9,1	12,8	3,1
Precipitação (mm)	329,1	181,4	198	74,7	28,1	9,7	7,9	14,8	55,5	104,7	239,8	358,9	1602,6
Dias com precipitação (>= 1mm)	16	11	11	6	3	1	1	2	4	8	14	18	95
Umidade relativa compensada (%)	73	70	71,4	69,2	67,4	66,2	62,4	57,8	60,4	64,1	70,5	74	67,2
Horas de sol	176	190,8	194,9	210,7	221,2	229,9	240,5	241,5	202,5	196,5	166,9	153,3	2424,7

Figura 43 - Dados meteorológicos de 1931 até 2020 para a cidade de Belo Horizonte

Fonte: (INMET, 2020)

Como o dia 16 de fevereiro foi o dia de maior irradiação solar segundo dados do *software* Radiasol, foram coletadas as temperaturas por hora desse dia, como mostra o gráfico da figura 44.

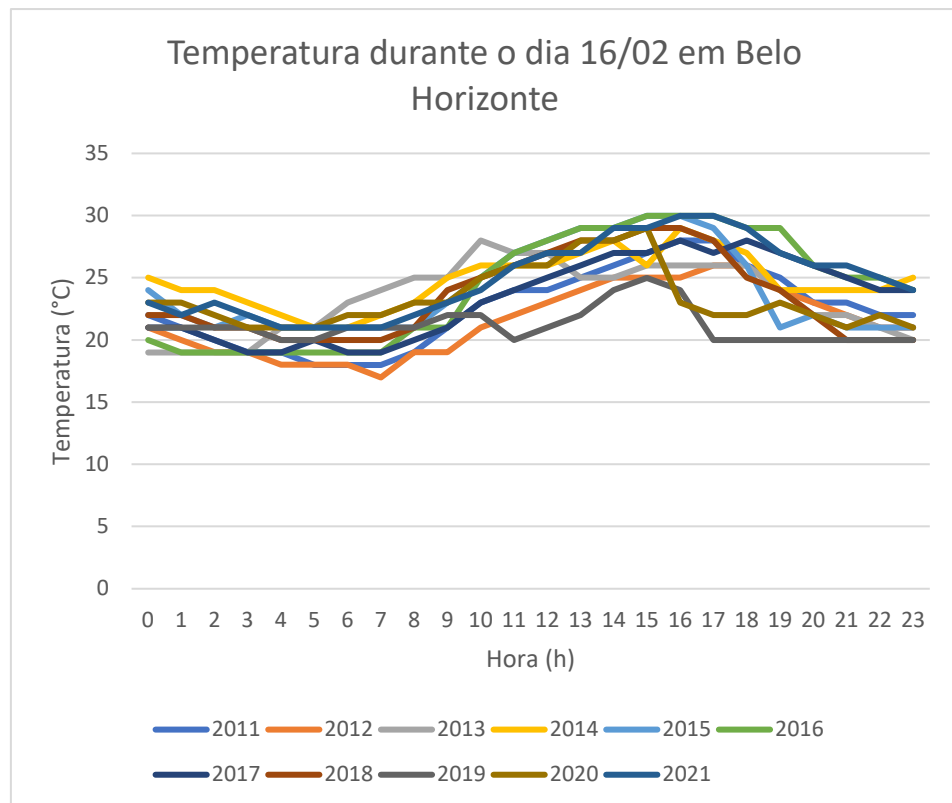


Figura 44 - Temperatura em °C por hora do dia 16 de fevereiro dos anos de 2011 a 2021  
Fonte: Pesquisa direta e (FREEMETEO, 2021)

#### 4.1.2 Características construtivas da subestação

A subestação é feita de alvenaria e contém um portão para a entrada de equipamento e eventuais manutenções.

As dimensões do local de instalação do transformador são as seguintes:

- Altura de 6 m;
- Comprimento de 5,8 m;
- Largura 3,3 m.

As paredes da subestação são feitas de blocos M10, aparentes. Os valores da transmitância térmica, segundo Fogiatto (2015), de blocos de concreto estão mostrados na tabela 6.



Tabela 6 - Valores de transmitância térmica de blocos

<b>Bloco</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>
Concreto M-10	3,130
Concreto M-15	3,136
Cerâmica M-10	2,919
Cerâmica M-15	2,167

Fonte: adaptado de Fogiatto (2015)

Já a transmitância térmica do teto, que é feito de laje pré-moldada com tavela cerâmica é apresentada pela tabela 7. (CREMA; PELISSER, 2005)

Tabela 7 - Transmitância térmica de lajes

<b>Laje</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>
Utilizando tavela cerâmica	3,20
Utilizando bloco de EPS	2,84

Fonte: adaptado de Crema e Pelisser (2005)

O portão é confeccionado de chapa de aço de 0,5 mm e um isolante interno nas chapas para diminuir a quantidade de calor que será gerada devido a insolação no mesmo. O isolante usado foi a espuma rígida de poliuretano, com espessura de 100 mm.

## 4.2 Cálculo da carga térmica

### 4.2.1 Inversores

Está instalado um conjunto de 9 inversores 6060 FV Canadian CS – 330W que segundo o fabricante tem um rendimento igual a 98,8%.(SMA, 2021) Com o fornecimento da potência vinda das placas, figura 36, e a equação 21 é possível fazer o cálculo da perda do inversor, que será dissipada em forma de calor. A tabela 8 mostra os valores da carga térmica do inversor por horário de funcionamento. Quando não há incidência solar os inversores ficam desligados. Usando a equação:

$$q_{\text{equipamento}} = (1 - \eta) * P \quad (21)$$

Tabela 8 - Carga térmica dos inversores

<b>Hora</b>	<b>Potência Placas (KW)</b>	<b>Carga térmica (KW)</b>
6	600,68	7,21
7	733,67	8,80
8	860,97	10,33
9	970,75	11,65
10	1051,60	12,62
11	1094,51	13,13
12	1094,51	13,13
13	1051,60	12,62
14	970,75	11,65
15	860,97	10,33
16	733,67	8,80
17	600,68	7,21
18	472,51	5,67

Fonte: Pesquisa direta, 2021

#### 4.2.2 Transformador

O rendimento do transformador é informado pelo fabricante e tem os valores de acordo com o fator de carga, mostrado na tabela 9.

Tabela 9 - Rendimento do transformador WEG 1000kVA

<b>Fator de carga</b>	<b>Rendimento</b>
0,25	98,83
0,5	98,84
0,75	98,59
1	98,28

Fonte: (WEG, 2021a)

Com as perdas do inversor a potência transmitida ao transformador é um pouco menor. Utilizando a tabela 9 pode-se fazer a interpolação dos valores de rendimento pelo fator de carga (K) para obter os rendimentos de cada hora. E assim, utilizando a equação 21, calcula-se a carga térmica do transformador. O fabricante do transformador também fornece a perda em vazio, que é a perda quando o transformador não está recebendo carga. Nesse caso quando não tiver energia vinda das placas solares. Os valores de carga térmica são mostrados na tabela 10.

Tabela 10 - Carga térmica do transformador

Hora	Potência no transformador (kW)	K	Rendimento (%)	Carga térmica (kW)
0				1,8
1				1,8
2				1,8
3				1,8
4				1,8
5				1,8
6	593,47	0,59	0,99	7,48
7	724,87	0,72	0,99	10,10
8	850,64	0,85	0,98	13,16
9	959,10	0,96	0,98	16,15
10	1038,98	1,04	0,98	17,87
11	1081,38	1,08	0,98	18,60
12	1081,38	1,08	0,98	18,60
13	1038,98	1,04	0,98	17,87
14	959,10	0,96	0,98	15,57
15	850,64	0,85	0,98	13,16
16	724,87	0,72	0,99	10,10
17	593,47	0,59	0,99	7,48
18	466,84	0,47	0,99	5,42
19				1,8
20				1,8
21				1,8
22				1,8
23				1,8

Fonte: Pesquisa direta, 2021

#### 4.2.3 Irradiação solar

Como condição de contorno inicial, os estudos mostraram que a temperatura média do ambiente que comporta um transformador deve ser 30°C e com a tabela 8 pode-se verificar que a temperatura média máxima de Belo Horizonte foi de 29°C e máxima recorde foi 35°C. De

forma conservadora, foi utilizado 32°C como temperatura externa, que é a média entre a média máxima e a máxima recorde. Então as temperaturas de 30°C e 32°C foram utilizadas como interna e externa, respectivamente, para o cálculo do ganho de calor pela irradiação solar.

A tabela 11 mostra os valores da condutividade térmica do aço e da espuma rígida de poliuretano, que são os materiais que compõem o portão. Esses valores foram retirados da figura 35.

Tabela 11 - Condutividade térmica dos materiais que compõem o portão

<b>Material</b>	<b><math>\lambda</math> (W/ (m.K))</b>
Aço, ferro fundido	55
Espuma rígida de poliuretano	0,030

Fonte: Pesquisa direta, 2021

O portão é confeccionado com 2 chapas de aço galvanizado e contém isolante. Com as equações 19 e 20 pode-se calcular a resistência térmica e a transmitância térmica do portão, já que a espessura da chapa é de 0,005 m e do isolante 0,1 m, respectivamente. E os valores da condutividade térmica apresentados na tabela 11.

$$R_{chapa\ de\ aço} = \frac{0,005}{55} = 9,1 \times 10^{-5} \frac{m^2 K}{W}$$

$$R_{espuma} = \frac{0,1}{0,03} = 3,33 \frac{m^2 K}{W}$$

$$U_{portão} = \frac{1}{R_{espuma} + 2R_{chapa\ de\ aço}} = 0,3 W/m^2K$$

Com os valores acima e as tabelas 5, 6 e 7 pode-se tirar as propriedades de cada parede, teto e portão para calcular a carga térmica que será inserida no recinto devido a irradiação solar. A orientação, área, transmitância térmica e absorvidade de cada superfície, junto com a transmitância térmica, são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Orientação, área e propriedades das paredes, teto e portão

<b>Superfície</b>	<b>Orientação</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>U (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b><math>\alpha</math></b>
Parede	Norte	31,8	3,313	0,8
Parede	Sul	34,8	3,313	0,8
Parede	Leste	19,8	3,313	0,8
Parede	Oeste	19,8	3,313	0,8
Teto	-	16,5	3,2	0,8
Portão	Norte	3	0,3	0,25

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Assim, utilizando os valores de radiação solar (RS) incidente em cada plano da tabela 7, os valores da resistência térmica superficial externa (Rse) da tabela 3 (igual a 0,04 para todas as orientações na parede externa) e aplicando nas equações de fluxo de calor por irradiação nos planos horizontal e vertical, equações 17 e 18, respectivamente, mostradas na tabela 13, obteve-se os seguintes valores de fluxo de calor nas paredes, portão e teto, como também, o somatório de todos eles, mostrado na tabela 14.

Tabela 13 - Equações do fluxo na superfície vindo da irradiação solar

<b>Plano</b>	<b>Equação</b>
Horizontal	$\phi = U \cdot A \cdot (\theta_e + \alpha \cdot RS \cdot R_{se} - 4 - \theta_i)$
Vertical	$\phi = U \cdot A \cdot (\theta_e + \alpha \cdot RS \cdot R_{se} - \theta_i)$

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Tabela 14 - Fluxo de calor nas paredes devido a irradiação solar em W

<b>Hora</b>	<b>Teto</b>	<b>Parede Norte</b>	<b>Parede Sul</b>	<b>Parede Oeste</b>	<b>Parede Leste</b>	<b>Portão norte</b>	<b>Total</b>
6	277,94	382,64	459,32	391,49	257,14	2,72	1771,25
7	533,07	595,04	684,38	637,08	410,38	4,08	2864,02
8	808,47	770,34	843,02	815,51	513,23	5,54	3756,12
9	1066,98	942,28	975,83	882,68	569,91	6,92	4444,61
10	1264,67	1070,39	1057,00	842,80	603,50	7,97	4846,32
11	1374,49	1141,19	1093,89	712,65	622,39	8,56	4953,17
12	1374,49	1141,19	1093,89	622,39	712,65	8,56	4953,17
13	1264,67	1070,39	1057,00	603,50	842,80	7,97	4846,32
14	1066,98	942,28	975,83	569,91	882,68	6,92	4444,61
15	808,47	770,34	843,02	513,23	815,51	5,54	3756,12
16	533,07	595,04	684,38	410,38	637,08	4,08	2864,02
17	277,94	382,64	459,32	257,14	391,49	2,72	1771,25

Fonte: Pesquisa direta, 2021

#### 4.2.4 Total

A carga térmica total gerada no ambiente é a soma das cargas térmicas calculadas. Na tabela 15 é mostrado a carga térmica da subestação em cada hora do dia.

Tabela 15 - Carga térmica total no ambiente em W

Hora	Irradiação solar	Transformador	Inversores	Total
0	0	1800	0	1800
1	0	1800	0	1800
2	0	1800	0	1800
3	0	1800	0	1800
4	0	1800	0	1800
5	0	1800	0	1800
6	1771,25	7481,82	7208,18	16461,25
7	2864,02	10102,30	8804,09	21770,41
8	3756,12	13164,64	10331,70	27252,46
9	4444,61	16148,61	11648,96	32242,18
10	4846,32	17870,42	12619,17	35335,91
11	4953,17	18599,73	13134,16	<b>36687,06</b>
12	4953,17	18599,73	13134,16	<b>36687,06</b>
13	4846,32	17870,42	12619,17	35335,91
14	4444,61	15573,16	11648,96	31666,72
15	3756,12	13164,64	10331,70	27252,46
16	2864,02	10102,30	8804,09	21770,41
17	1771,25	7481,82	7208,18	16461,25
18	0	5420,51	5670,16	11090,67
19	0	1800	0	1800
20	0	1800	0	1800
21	0	1800	0	1800
22	0	1800	0	1800
23	0	1800	0	1800

Fonte: Pesquisa direta, 2021.

A figura 45 mostra o gráfico da carga térmica total do ambiente. Como se trata de um transformador que opera com energia elétrica vinda de placas solares os picos de potência do transformador serão quando a radiação solar está mais alta. As cargas térmicas de irradiação

solar mais altas também serão no mesmo período. E nos períodos onde não há luz solar, a carga térmica fica sendo a carga térmica em vazio do transformador, igual a 1800 W.

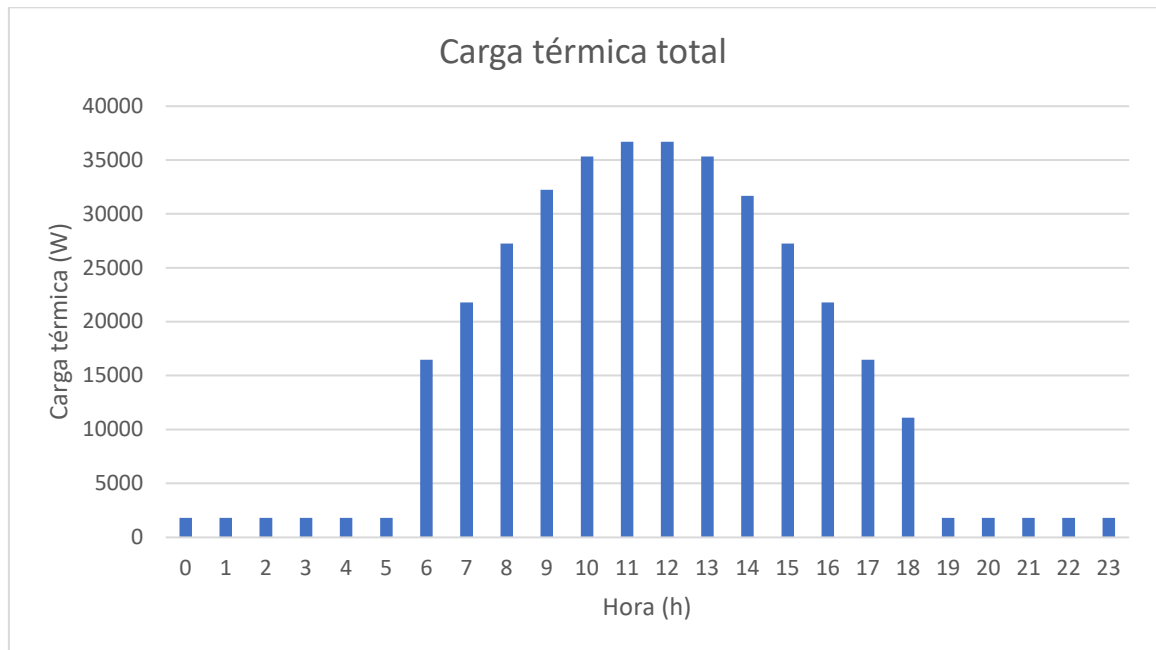


Figura 45 - Carga térmica total em W da subestação  
Fonte: Pesquisa direta, 2021

Não foram levados em consideração as cargas térmicas geradas por iluminação e por pessoas no local, pois essa subestação ficará fechada com presença de pessoa somente para fazer eventuais manutenções. As manutenções serão feitas com a porta aberta e em horários de menor irradiação solar, o que garantirá temperaturas confortáveis para se fazer a manutenção. Também foi desconsiderado a transferência de calor por condução pelas superfícies da subestação.

### 4.3 Vazão de ar

Para garantir a expectativa de vida do transformador, por volta dos 30 anos de operação, é necessário que a temperatura ambiente máxima seja 40°C. Com os cálculos da carga térmica gerada pelos inversores, transformador, e também o ganho de calor devido a irradiação solar, tem-se uma carga máxima no horário das 11 e 12 horas. Esses valores serão utilizados para calcular a vazão de ar, pois são valores máximos no ano, já que foi utilizada a irradiação solar do dia 16 de fevereiro, o qual apresentou maiores valores do ano.



A temperatura de operação segura dos inversores, segundo o fabricante, está perto dos 60 °C, por isso a temperatura crítica do ambiente será relacionada com a temperatura ideal do transformador.

Na tabela 15 pode-se extrair uma carga térmica de 36687,06 W. Com a temperatura média máxima de Belo Horizonte de 32 °C e considerando a temperatura do interior da subestação de 40°C, tem-se os seguintes valores de massa específica e de calor específico do ar externo.

$$\rho_e = 1,041271 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1000 \text{ J/(kg.}^\circ\text{C)}$$

Aplicando esses valores na equação 9, que é a equação da vazão de ar, máxima, necessária para o garantir uma temperatura adequada ao ambiente, tem-se:

$$Q_e = \frac{\dot{q}_T}{\rho_e \cdot c_p \cdot \Delta T} = \frac{36687,06}{1,041271 \times 1000 \times (40 - 32)} = 4,40 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 15854,83 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

A figura 46 mostra o gráfico da vazão de ar necessária para cada hora do dia, calculada com a equação 9.

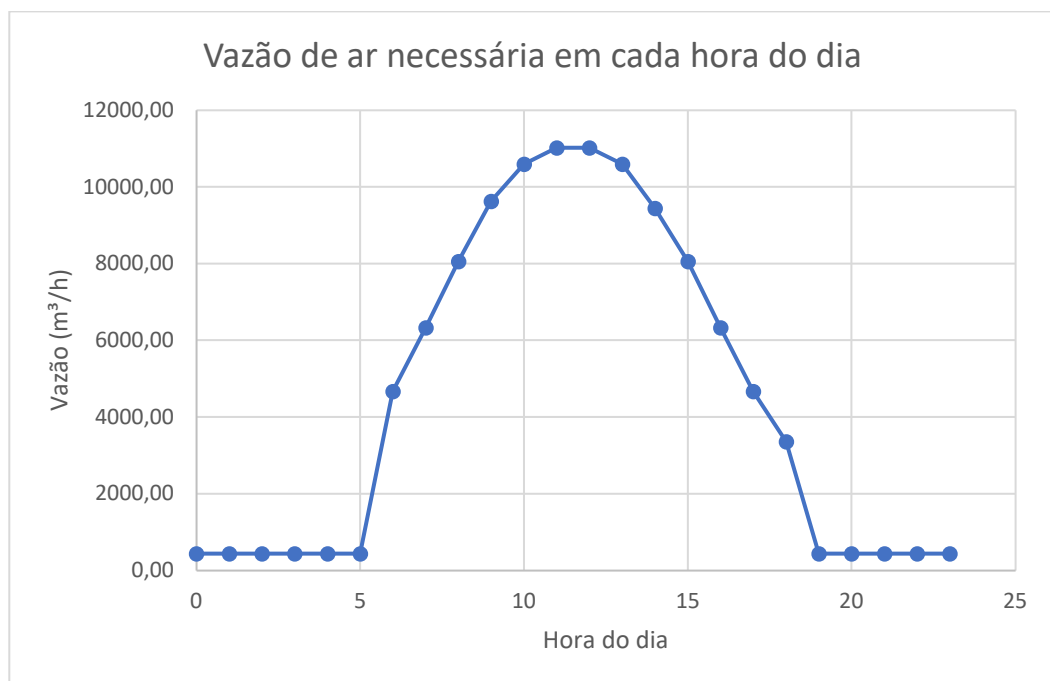


Figura 46 - Gráfico da vazão de ar necessária para a subestação em cada hora do dia  
Fonte: Pesquisa direta, 2021

Aplicando um fator de segurança de 5% na vazão máxima obtida, tem-se uma vazão máxima de ar necessária igual a:

$$Q_e = 16647,57 \frac{m^3}{h}$$

#### **4.4 Validação da quantidade de ar necessária**

Pela pesquisa feita observou-se que, para garantir uma expectativa de vida em torno dos 30 anos de um transformador, a temperatura ambiente não pode ultrapassar 40°C. Mas também foi observado que a temperatura média do ambiente não pode ser superior a 30°C, principalmente quando o transformador é submetido a sobrecargas, como é o caso desse transformador.

Então, com o intuito de garantir que essa condição de temperatura ambiente está sendo satisfeita, foi fixada a vazão de 16647,57 m<sup>3</sup>/h, calculada anteriormente, e com a temperatura média de cada hora do dia 16 de fevereiro da cidade de Belo horizonte, nos últimos 11 anos, obtida com o gráfico da figura 44, foi calculada a temperatura interna da subestação, mostrada na tabela 16.

Tabela 16 - Temperatura interna obtida com a vazão de ar calculada

<b>Hora</b>	<b>Temperatura média externa (°C)</b>	<b>Carga térmica Total (W)</b>	<b>Vazão (m³/s)</b>	<b>Temperatura interna (°C)</b>
0	21,9	1394,46	4,62	22,3
1	21,3	1394,46	4,62	21,6
2	20,8	1394,46	4,62	21,2
3	20,5	1394,46	4,62	20,8
4	20,1	1394,46	4,62	20,5
5	20,0	1394,46	4,62	20,4
6	20,3	14839,09	4,62	23,2
7	20,4	20148,25	4,62	24,3
8	21,4	25630,30	4,62	26,4
9	22,5	30620,02	4,62	28,4
10	24,3	33713,75	4,62	30,8
11	25,0	35064,90	4,62	31,8
12	25,6	35064,90	4,62	32,5
13	26,4	33713,75	4,62	32,9
14	27,1	30044,56	4,62	32,9
15	27,5	25630,30	4,62	32,6
16	27,5	20148,25	4,62	31,4
17	26,7	14839,09	4,62	29,7
18	25,8	10685,13	4,62	28,1
19	24,4	1394,46	4,62	24,7
20	23,3	1394,46	4,62	23,6
21	22,6	1394,46	4,62	23,0
22	22,3	1394,46	4,62	22,6
23	22,0	1394,46	4,62	22,4

Fonte: Pesquisa direta, 2021

A temperatura média interna obtida foi de 26,18 °C, que satisfaz as condições de temperatura, garantindo uma expectativa de vida adequada para o transformador. Como a diferença de temperatura foram menores, entre interna e externa, os valores de carga térmica por radiação solar serão menores, assim a vazão obtida será suficiente para manter as condições necessárias de temperatura.

As quantidades de partículas que possuem o local de instalação dessa subestação são pequenas e não prejudicam os equipamentos inseridos na subestação, por isso não será utilizado sistema de filtragem nos ventiladores. Fazendo assim que somente o calor sensível seja considerado para a vazão de ar.

#### **4.5 Seleção de ventilador**

Considerando a vazão de ar necessária para suprir as condições de temperatura necessárias, a fim de manter uma expectativa de vida superior a 30 anos do transformador, foi selecionado um sistema de ventilação para a subestação.

Como nesse caso não há presença de dutos e o ventilador será colocado diretamente na parede, sem obstrução da entrada de ar, foi considerada uma perda de carga de 15 mmca.

Para a seleção do ventilador foi utilizado o *software* Vortex. A figura 47 mostra a interface inicial do *software*. Nessa área se faz a entrada de dados para a seleção do ventilador, a pressão estática, temperatura do ar, altitude do local de instalação e o modelo de ventilador.

Pelos estudos, observou-se que o ventilador axial seria o mais adequado para essa operação, pois esse ventilador tem uma aplicação de ar no sentido do eixo, possibilitando a instalação nas paredes, sem necessidade de acessórios. O fabricante mostra que o modelo AVR-AL tem as características necessárias para o projeto.

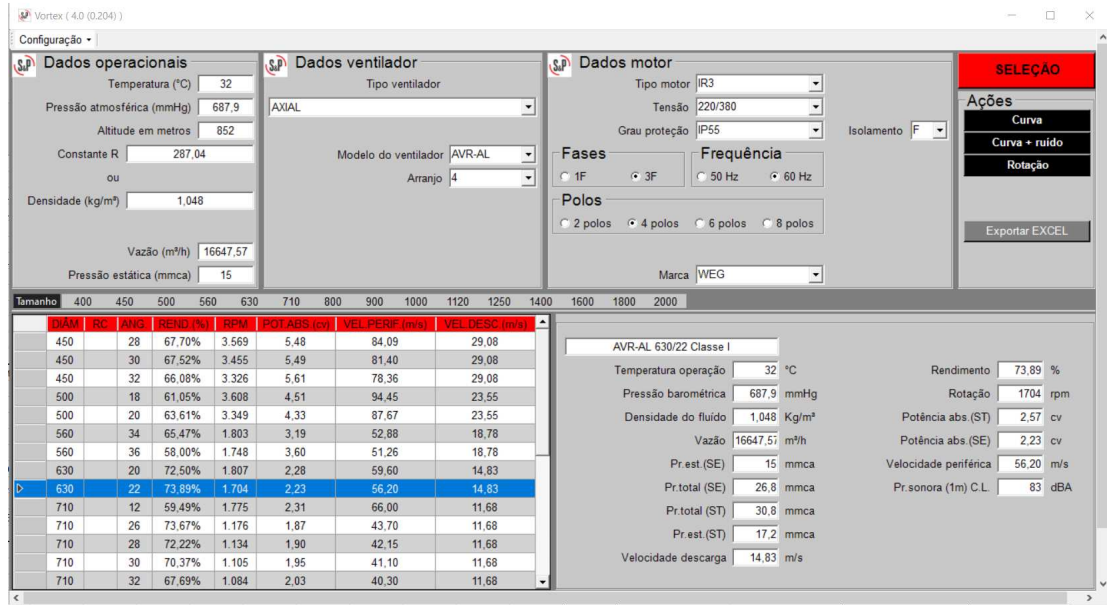


Figura 47 - Interface do software Vortex  
 Fonte: Pesquisa direta, 2021

Observado o rendimento de cada ventilador proposto pelo *software*, tem-se um ventilador com um rendimento de 73,89% como o ideal para a aplicação. Porém, a fim de se reduzir o custo em equipamentos foi selecionado um motor de 4 polos, rotação 1750 RPM, de forma a não precisar utilizar as relações de rotação. A figura 48 mostra as alterações de rotação inseridas no *software*.

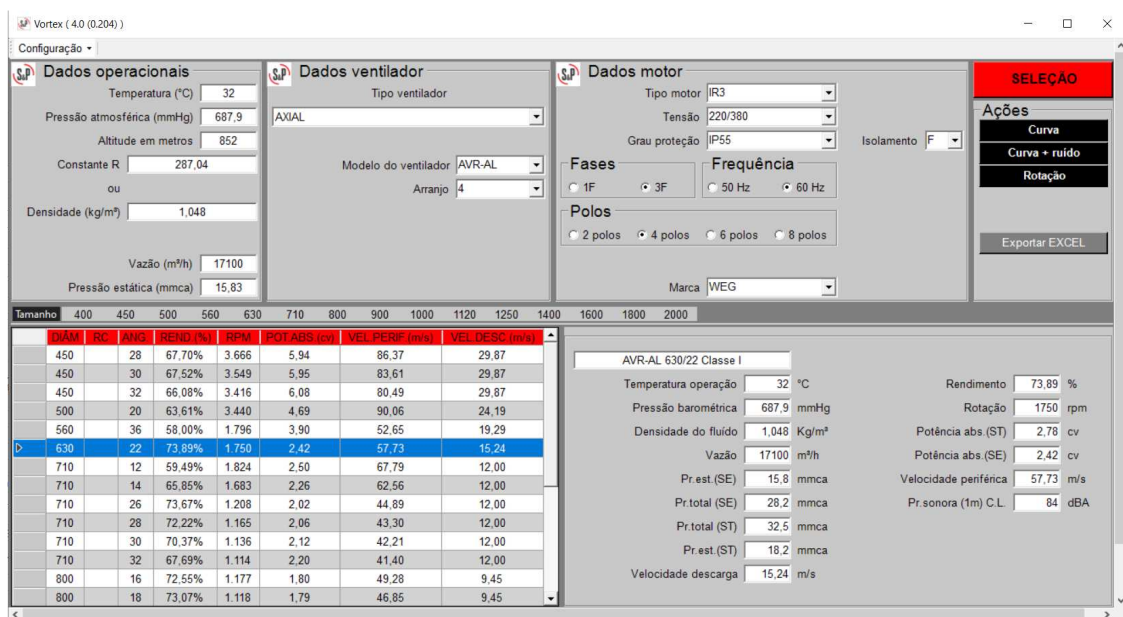


Figura 48 - Software Vortex, seleção do ventilador a 1750 RPM  
 Fonte: Pesquisa direta, 2021

A figura 48 mostra os valores obtidos de vazão com a seleção do motor de 4 polos. A vazão aumentou para 17100 m<sup>3</sup>/h, o que significa que a necessidade de ar será suprida com a utilização desse ventilador, porém o rendimento foi para 70,1%. A figura 49 mostra a curva desse ventilador e o ponto de operação do mesmo.

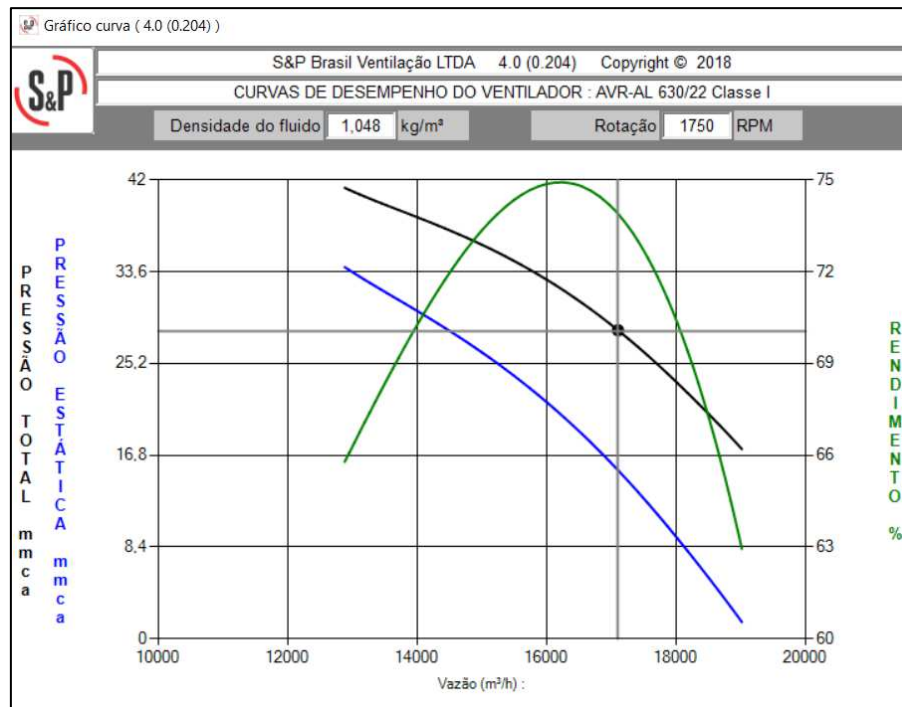


Figura 49 - Curva do ventilador AVR-RL 630/22 Classe I  
Fonte: Pesquisa direta, 2021

O ventilador selecionado foi o AVR-AL 630/22 da empresa OTAM. A figura 50 mostra o modelo de ventilador que será utilizado.



Figura 50 - Ventilador AVR-AL 630/22  
Fonte: (OTAM, 2021)

O software indicou um motor de aproximadamente 3 CV e 4 polos. Com isso foi selecionado o motor W22 IR3 Premium 3 CV 4P L90L 3F 220/380 V 60 Hz IC411 - TFVE - B14D, da empresa WEG. A figura 51 mostra uma foto desse equipamento.



Figura 51 - Motor WEG 3 CV e 4 polos  
Fonte: (WEG, 2021b)

Valores de ruídos não foram considerados, pois a subestação é instalada em um local onde não há presença de pessoas e animais.

#### **4.6 Local de instalação do ventilador**

O ventilador contido na subestação é do tipo ONAN, ou seja, a troca térmica do óleo isolante será feita pelas paredes que contém o reservatório do óleo e as aletas do transformador. Então, o ar inserido para retirar calor do transformador deve passar sobre a superfície da estrutura do equipamento.

Para garantir uma boa circulação de ar sobre o transformador foi recomendado a utilização de dois ventiladores, um para insuflação do ar e outro para a exaustão. Como observado em pesquisa, a entrada de ar em um recinto de transformação de energia deve ser colocada na parte inferior da parede com a abertura de saída na parede oposta, para garantir um fluxo de ar sobre toda a superfície do transformador.

Foi proposto a colocação de um ventilador a 0,2 m do chão na parede leste, que seria o ventilador que fará a insuflação do ar para o interior do recinto e um ventilador a 1,5 m do teto para, além de garantir maior fluxo de ar sobre o transformador, também garantir a retirada de ar aquecido, que possa formar bolsas de ar quente na parte superior da subestação.

A figura 52 mostra os posicionamentos dos ventiladores na subestação.

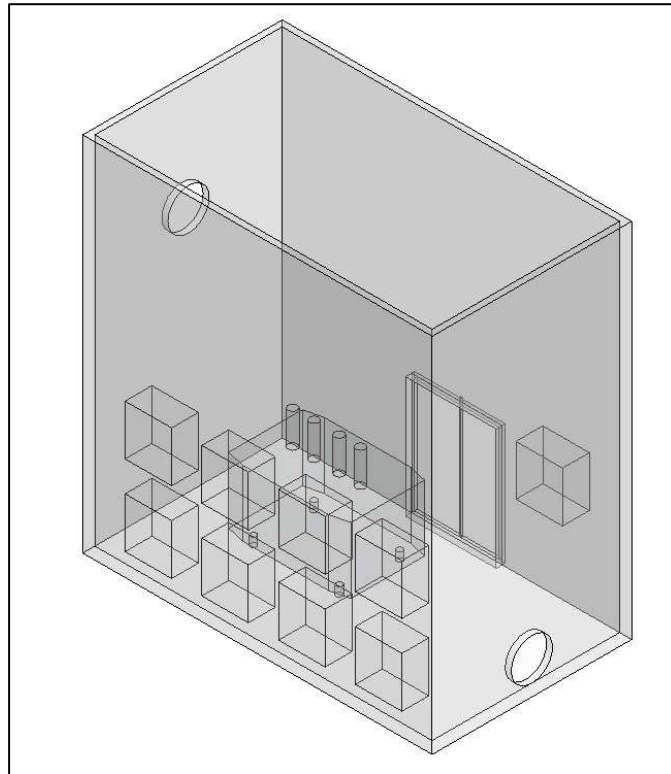


Figura 52 - Subestação com os locais de instalação dos ventiladores  
Fonte: Pesquisa direta, 2021

É recomendada a construção de uma estrutura, tipo beiral, no ventilador que faz a sucção do ar. Essa proteção terá a função de evitar que o ventilador puxe água para o interior da subestação quando o dia apresentar chuva.



## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

O consumo de energia elétrica vem aumentando ao longo dos anos, e com isso há um aumento na utilização de equipamentos para geração e distribuição de energia elétrica. O transformador é um desses equipamentos, e é um equipamento de alto valor agregado e necessário para a distribuição de energia. Com o intuito de garantir a confiabilidade desse equipamento é preciso manter condições ambientes adequadas de operação.

Os transformadores são responsáveis por fazer a mudança de tensão da energia elétrica, fazendo com que o transporte da energia seja feito com tensões maiores, garantindo redução do custo da transmissão, e fazendo a transformação da tensão para valores adequados para o uso, principalmente em residências, afim de garantir tensões seguras para os consumidores.

A temperatura dos materiais, equipamentos e sistemas não deve ultrapassar a temperatura admissível para garantir o correto funcionamento de instalações mecânicas e elétricas. A temperatura ambiente tem grande relação com a temperatura em que os equipamentos irão operar. Uma temperatura ideal no interior dos locais de instalação de equipamentos é de grande importância para manter operações sem paradas inesperadas ou desgaste prematuro dos componentes dos equipamentos.

Os transformadores operam de forma segura e com a expectativa de vida próxima dos 30 anos, se as temperaturas do equipamento não ultrapassem valores admissíveis. Para transformadores a temperatura máxima do ambiente não deve ultrapassar os 40°C e a temperatura média não deve ultrapassar os 30°C. Essa temperatura ambiente, entre os valores ideais, garante que não haverá uma elevação de temperatura que vá prejudicar os materiais isolantes do enrolamento do transformador fazendo com que a vida útil desse equipamento tenha um tempo menor.

A energia solar está sendo difundida como fonte de energia elétrica. O sistema fotovoltaico de produção de energia elétrica é composto, além dos módulos que fazem a transformação da energia vinda do sol para energia elétrica, por inversores e transformadores. Esses equipamentos são geralmente instalados em subestações fechadas, para garantir a segurança dos equipamentos.

Porém, todo equipamento apresenta perdas, que podem ser convertidas em calor. Além disso, as subestações podem ficar expostas ao sol, que fornece uma carga térmica no interior do ambiente fazendo com que a temperatura do local de instalação dos equipamentos aumente.

A carga térmica gerada devida às perdas nos equipamentos e os ganhos relativos à irradiação solar faz com que a temperatura dentro do ambiente fechado aumente, ultrapassando os valores admissíveis para a operação dos sistemas elétricos e mecânicos.

A ventilação é bastante utilizada para garantir condições do ar em locais que precisam ser controladas. Os ambientes podem precisar reduzir as concentrações de poluentes e partículas, ou podem ter que apresentar temperaturas ideais, seja para conforto térmico de pessoas ou garantir bom funcionamento de equipamentos.

A ventilação natural depende das aberturas e velocidades de vento da região, e isso é um fator que não permite o controle absoluto sobre a vazão de ar no ambiente. Assim, as condições de ar podem ser prejudicadas. Quando se trata de ambientes fechados, com equipamentos expostos ao sol, a ventilação por meios mecânicos, ou seja, utilizando ventiladores é uma forma de garantir as condições do ar necessárias.

O dimensionamento de um sistema de ventilação para um transformador a óleo em uma subestação deve levar em consideração os ganhos térmicos no interior do espaço, o conhecimento das posições de entrada e saída do fluxo de ar e as temperaturas adequadas para operação.

Neste trabalho são apresentados o dimensionamento e a seleção de ventiladores para garantir a temperatura adequada de um transformador presente em uma subestação de uma usina solar.

Foram coletados os dados do local em que a subestação é instalada. As informações necessárias da cidade de Belo Horizonte foram a irradiação solar incidente, a temperatura presente na cidade e sua altitude.

A carga térmica oriunda de equipamentos foi calculada devido à potência aplicada nos inversores e ao transformador. Essa carga térmica foi somada com a energia térmica proporcionada pelo sol.

Para essa subestação foi determinada uma vazão de ar de 16647,57 m<sup>3</sup>/h, que garantirá uma temperatura média ideal e que a temperatura máxima não ultrapasse valores seguros de operação do transformador.

A seleção do ventilador proporcionou uma vazão de 17100 m<sup>3</sup>/h, utilizando um motor de 3 CV e 4 polos (1750 RPM). Esses equipamentos farão com que a condição térmica ideal do ar seja mantida, afim de garantir uma expectativa de vida, do transformador, superior aos 30 anos.

O cálculo feito foi para as condições mais extremas, já que se utilizou os maiores valores de irradiação solar do ano e a temperatura acima da média máxima. Com isso a vazão de ar que será empregada na subestação será suficiente para manter a temperatura ambiente em valores aceitáveis.

O posicionamento dos ventiladores também obedeceu às recomendações da passagem de fluxo nos equipamentos geradores de calor, e no transformador o qual tem que ser mantido em temperaturas ideais para garantir boa vida útil.

## 5.2 Recomendações

A partir deste trabalho, são apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Calcular a estimativa da temperatura do topo de óleo do transformador pela potência aplicada no equipamento;
- Fazer o uso de *software* de dinâmica dos fluidos computacional para garantir que o fluxo de ar está passando nos locais ideais, analisando as posições dos ventiladores;
- Fazer o uso de software de dinâmica dos fluidos computacional para conhecer as temperaturas mais próximas da real possível;
- Calcular a carga térmica por irradiação solar com as paredes da subestação pintadas de branco;
- Fazer o estudo dos horários que um ou dois ventiladores da subestação podem ser desligados, a fim de economizar energia.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–21, 2003.

ASSIS, M. C. D. E. **Metodologia do Trabalho Científico**. Disponível em: <[http://biblioteca.virtual.ufpb.br/files/pub\\_1291081139.pdf](http://biblioteca.virtual.ufpb.br/files/pub_1291081139.pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2021.

ASSUNÇÃO, T. C. B. N. Contribuição à modelagem e análise do envelhecimento de transformadores de potência. **UFMG**, p. 207, 2007.

BARBOSA FILHO, W. P. et al. Expansão Da Energia Solar Fotovoltaica No Brasil: Impactos Ambientais E Políticas Públicas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 628, 2015.

BARROSO, F. Análise do comportamento do equipamento de MT em postos de transformação, sob condições de temperatura e humidade desfavoráveis. **Instituto Superior de Engenharia de Coimbra**, 2014.

BORRÉ, R. Sistema de ventilação em ambiente industrial. 2013.

BRASIL, L. E. **Transformadores Eficientes são Indispensáveis na Distribuição de Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://leonardo-energy.org.br/noticias/transformadores-eficientes-sao-indispensaveis-na-distribuicao-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 16 mar. 2021.

CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas Teoria e Ensaio**. 4. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2011.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação Industrial**. 2. ed. Florianópolis: Série Didática, 2009.

COSTA, N. D. O. DA. Ventilação de Locais Afetos a Serviços Técnicos Elétricos. **Instituto Superior de Engenharia do Porto**, 2014.

CREDER, H. Instalação de ar condicionado. p. 316, 2004.

CREMA, D. B.; PELISSER, F. Cálculo Do Desempenho Térmico De Lajes Pré-. n. 1, p. 1–15, 2005.

CRESESB. **Irradiação Solar em Belo Horizonte**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

EPE. **Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional)**. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-\(nacional\)](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-(nacional))>. Acesso em: 15 fev. 2021a.

EPE, E. DE P. E. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>>. Acesso em: 12 fev. 2021b.

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

FINOCCHIO, M. A. F.; FRANÇA, J. A. DE. MODELO TÉRMICO PARA TRANSFORMADORES A SECO E PREVISÃO DA TEMPERATURA DE TOPO. **VI ENDITEC - Encontro Nacional de Difusão Tecnológica**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2009.

FITZGERALD, A. E.; JR., C. K.; UMANS, S. D. **Maquinas Eletricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

FOGIATTO, M. A. Avaliação da transmitância térmica de blocos de concreto e cerâmica utilizados na construção civil. 2015.

FREEMETEO. **Belo Horizonte - Histórico climático por dia**. Disponível em: <<https://freemeteo.com.br/clima/belo-horizonte/historico/historico-por-dia/?gid=3470127&station=22788&date=2011-02-16&language=portuguesebr&country=brazil>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. v. 38

HOLMAN, J. P. **Transferencia de calor por Radiación**. 10<sup>a</sup> ed. México: McGraw-Hill, 1999.

IEA. **Global electricity demand by region in the Stated Policies Scenario, 2000-2040**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-demand-by-region-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

IEA. **Electricity consumption (Word)**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Electricity and heat&indicator=TotElecCons>>. Acesso em: 14 fev. 2021a.

IEA. **Total final consumption (TFC) by source, World 1990-2018**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy consumption&indicator=TFCbySource>>. Acesso em: 15 fev. 2021b.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INMET. **Tempo e clima em Belo Horizonte**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/belo-horizonte-2889/t/fevereiro-2/#climate-table-month>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4. ed. Porto Alegre. Rio de Janeiro: Globo, 1982.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MESQUITA, A. S.; GUIMARÃES, F. DE A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de Ventilação Industrial**. São Paulo: Blucher, 1988.

MINAYO, M. C. DE S. et al. **Pesquisa Social: Teoria, Método e Criatividade**. 21. ed. Petrópolis: Vozes, 2002.

MONIZ, O. V. Perda de vida útil técnica e perda de vida útil econômica dos transformadores de distribuição. p. 175, 2007.

OLIVEIRA, J. M. DE. Noções de Ventilação Industrial. **UFPR**, 2012.

OTAM. **Catálogo OTAM**. Disponível em: <<https://www.valeclima.com.br/industrial>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

PERAZA, D. G. ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul programa de pós-graduação em engenharia mecânica**, v. 26, n. 4, p. 1–37, 2013.

SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. v. 29

SILVA, J. R. DA. Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento. UFSC, p. 122, 2005.

SMA. **Catálogo Inversores**. Disponível em: <<https://www.europe-solarstore.com/sma-sunny-highpower-peak3-shp-150-20.html>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

SOLAR, P. **Usina Solar no Brasil**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

TRAEI, T. E. MANUAL Transformador a Óleo de média força. n. 65, p. 1–16, 2016.

UNITED NATION. **Adoption of the Paris agreement framework Convention on Climate Change** ParisUnited Nation, , 2015.

VELÁZQUEZ, E.; MORA, N. D.; ALVES, M. E. G. MONITORAÇÃO ON-LINE DE TRANSFORMADOR REGULADOR DA ITAIPU BINACIONAL. **XX SNPTEE Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica**, v. 1, p. 1–8, 2009.

WEG. **Transformador Óleo 1000.0kVA 13.8/0.22kV CST ONAN**. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Geração%2C-Transmissão-e-Distribuição/Transformadores-e-Reatores-a-Óleo/Transformadores-de-Distribuição-a-Óleo/301-a-3-000-kVA/Transformador-Óleo-1000-0kVA-13-8-0-22kV-CST-ONAN/p/14114181>>. Acesso em: 10 fev. 2021a.

WEG. **Catálogo Motores WEG**. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-Elétricos/Trifásico---Baixa-Tensão/Usos-Gerais/W22/W22-/W22-IR3-Premium-3-cv-4P-L90L-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B14D/p/11912195>>. Acesso em: 13 mar. 2021b.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.