



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VINICIUS DA SILVA IMBIRIBA

RENDIMENTO DE UM AUTOTRANSFORMADOR EM INTERFACE COM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:
ESTUDOS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Palmas (TO)
2020

VINICIUS DA SILVA IMBIRIBA

**RENDIMENTO DE UM AUTOTRANSFORMADOR EM INTERFACE COM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:
ESTUDOS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr(a). Stefani Caroline Leal de Freitas

Palmas (TO)
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

I32r Imbiriba, Vinicius da Silva.

Rendimento de um autotransformador em interface com sistemas fotovoltaicos: Estudos e ensaios experimentais. / Vinicius da Silva Imbiriba. – Palmas, TO, 2020.

81 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2020.

Orientadora : Stefani Caroline Leal De Freitas

1. Sistemas Fotovoltaicos e Autotransformadores. 2. Rendimentos do autotransformador. 3. Rendimentos diário do autotransformador. 4. Autotransformador em interface a um sistema fotovoltaico. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

VINICIUS DA SILVA IMBIRIBA

**RENDIMENTO DE UM AUTOTRANSFORMADOR EM INTERFACE COM
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS:
ESTUDOS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

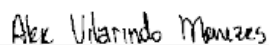
Monografia foi avaliada e apresentada à UFT –
Universidade Federal do Tocantins – Campus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia
Elétrica para obtenção do título de Engenheiro
Eletricista e aprovada em sua forma final pelo
Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 08 / 12 / 2020

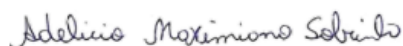
Banca Examinadora



Prof. Dr(a). Stefani Carolline Leal de Freitas. Orientadora, UFT.



Prof. Me. Alex Vilarindo Menezes. Examinador, UFT.



Prof. Dr. Adélcio Maximiano Sobrinho. Examinador, UFT.

Palmas (TO)
2020

AGRADECIMENTOS

Quero nesse momento, primeiramente agradecer a Deus, meu eterno amigo e Pai, por ter me sustentado e me amparado em todos os momentos da minha caminhada de vida até aqui, pois com Ele pude me manter de pé em todas as áreas, seja ela no físico, mental e/ou espiritual. Sem Ele, nenhum de nós estaríamos aqui.

Agradeço a minha mãe, Divina Márcia de Jesus da Silva, por ter acreditado e investido em mim, estando sempre à disposição para tudo que preciso e sempre me orientando para os caminhos certos.

Aos demais familiares que sempre estiveram por perto e sempre dispostos a ajudar no que fosse possível e necessário.

Quero agradecer aos grandes Professores que passaram por minha vida ao longo do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins, em especial, ao senhor Dr. Jadiel Caparros da Silva, Dr.(a) Gisele Souza Parmezzani Marinho e, principalmente, a minha orientadora Dr.(a) Stefani Carolline Leal de Freitas, que me auxiliou e me ensinou todos os aspectos para que fosse possível a realização desse trabalho.

Aos colegas e amigos de faculdade e de curso que a UFT me deu, em especial, ao Wilcley Brito Almondes Lima, que se tornou um irmão para mim, sempre me dando conselhos e me colocando para frente em todos os momentos de dificuldades e alegrias.

Deixo aqui também, o meu agradecimento aos companheiros da empresa júnior Tesla Engenharia e aos membros da LiES, que me deram a oportunidade de me desenvolver como pessoa e profissional de excelência.

Por fim, agradeço com todo o meu coração a minha melhor amiga e mulher da minha vida, a senhorita Adna Lívia Marinho Cordeiro, por toda paciência e cuidado, ajuda nas matérias e no TCC, e por toda a graça que me concedeu em poder ser seu parceiro para a vida toda.

RESUMO

O presente trabalho propôs calcular o rendimento de um autotransformador de 30 kVA a partir dos ensaios a vazio e de resistência elétrica e, simulando um sistema fotovoltaico, o seu rendimento diário em interface a esse sistema. Os inversores CC-CA, destinados ao condicionamento dos sinais elétricos gerados pelos módulos fotovoltaicos, apresentam, normalmente, como saída, tensões de linha e fase de 380/220 V, respectivamente. Embora existam inversores que tem como saída tensões de 220/127 V, eles são em menores quantidades e conseqüentemente tem um custo mais elevado. Uma das soluções para esse problema é a aplicação de um autotransformador, pois, o seu custo é mais baixo do que os tipos de inversores necessários e o seu rendimento é maior do que o de um transformador convencional. No autotransformador, porém, existem perdas que precisam ser analisadas, pois como a geração de energia que um sistema fotovoltaico produz não é constante ao longo do dia, há a necessidade de entender se em condições de cargas variáveis, o autotransformador continuaria trabalhando em uma faixa de rendimento aceitável de entrega de energia à rede. Os ensaios realizados se mostraram muito eficientes para a determinação dos rendimentos do autotransformador. Os procedimentos realizados foram o ensaio a vazio e o ensaio de resistência elétrica, para determinar o rendimento de um autotransformador, observando diferentes níveis de corrente ao longo do experimento. Observando os quadros dos resultados podem-se ver os rendimentos obtidos a partir dos ensaios, utilizando-se um fator de potência unitário e em 0,92. O autotransformador apresentou um alto rendimento diário para frações de cargas ao longo de 24 horas. Para este trabalho, concluiu-se que de acordo com a energia que esteja sendo entregue ao autotransformador, advindo de um sistema fotovoltaico, se o valor dessa energia for suficiente para atingir qualquer fração de carga do autotransformador isso resultará em um rendimento satisfatório no decorrer de um período determinado.

Palavras-chaves: Autotransformador. Sistemas Fotovoltaicos. Rendimento do autotransformador. Rendimento diário de um autotransformador.

ABSTRACT

The present work proposed to calculate the yield of a 30 KVA autotransformer from the vacuum and electrical resistance tests and, simulating a photovoltaic system, its daily yield in interface with that system. The CC-AC inverters, techniques for reversing the electrical signals generated by the photovoltaic modules, normally present, as output, voltages between phases and neutral phase of 380/220 V, respectively. Although there are converters that output voltages of 220/127 V, these are rarer and consequently have a higher cost. One of the solutions to this problem is the application of an autotransformer, because its cost is lower than the types of inverters located and its performance is higher than that of a conventional transformer. In the autotransformer, however, there are losses that need to be analyzed, because as the energy generation that a photovoltaic system produces is not regular throughout the day, there is a need to understand whether under conditions of variable loads, the autotransformer continues to work in a range acceptable yield of power delivery to the grid. The tests performed are extremely efficient for determining the specific data of the autotransformer. Procedures performed were the empty test and the electrical resistance test, to determine the performance of an autotransformer, observing different levels of current throughout the experiment. Looking at table results, you can see the necessary adjustments from the tests, using a unitary power factor and 0.92. The autotransformer delivered a high daily performance for fractions of loads over 24 hours. For this work, it was concluded that according to the energy being delivered to the autotransformer, coming from a photovoltaic system, if the value of that energy to reach any fraction of the autotransformer's load will result in a satisfactory performance over a period determined.

Keywords: Autotransformer. Photovoltaic systems. Performance of the autotransformer. Daily performance of an autotransformer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência com Geração Distribuída	19
Figura 2 - Sistema Solar Fotovoltaico Completo	20
Figura 3 - Representação da Estrutura de uma Célula Fotovoltaica.....	22
Figura 4 - Representação dos Tipos de Tipologias.....	24
Figura 5 - Representação das Linhas de Campo Magnéticas	32
Figura 6 - Representação da Lei de Lenz	32
Figura 7 - Diagrama Esquemático de um Transformador	33
Figura 8 - Fluxo Concatenado e Mútuo em Núcleo de Transformador.....	34
Figura 9 - Diagrama de um Autotransformador Abaixador	35
Figura 10 - Diagrama de Autotransformador Elevador.....	36
Figura 11 - Núcleo Envolvido	37
Figura 12 - Núcleo Envolvente.....	37
Figura 13 - Enrolamento de Baixa Tensão (a) e Enrolamento de Alta Tensão (b)	38
Figura 14 - Efeito da Relação de Transformação no Rendimento do Transformador	40
Figura 15 - Autotransformador ATT	45
Figura 16 - Placa de Identificação do Autotransformador	49
Figura 17 - Ligação entre a Bancada e o Variador de Tensão.....	50
Figura 18 - Ligação entre o Analisador e o Autotransformador.....	51
Figura 19 - Sistema Final do Ensaio a Vazio	52
Figura 20 - Valores de Tensões e Correntes do Ensaio a Vazio.....	52
Figura 21 - Valores de Potência e Fator de Potência do Ensaio a Vazio	53
Figura 22 - Esquema para realizar o ensaio a vazio	55
Figura 23 - Circuito equivalente para o transformador a vazio	55
Figura 24 - Vista Superior do Autotransformador	58
Figura 25 - Vista Frontal do Autotransformador.....	58
Figura 26 - Fonte de Alimentação GW GPC-3020D ajustada em 1 A.....	59
Figura 27 - Ensaio de Resistência Elétrica H_1-NH_0	60
Figura 28 - Esquema de Ligação do Ensaio de Resistência Elétrica.....	60
Figura 29 - Esquema de montagem para o ensaio em curto-circuito	66
Figura 30 - Circuito equivalente para o transformador em curto-circuito.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Medidas de Base e Altura de cada Camada	61
Quadro 2 - Comprimento Total em cada Camada	62
Quadro 3 - Resistência do Fio	62
Quadro 4 - Resistência Total em cada Bobina do Primário	62
Quadro 5 - Ensaio de Resistência Elétrica no Primário.....	65
Quadro 6 - Ensaio de Resistência Elétrica no Secundário.....	65
Quadro 7 - Dados coletados do Ensaio a Vazio	69
Quadro 8 - Dados obtidos por meio do Ensaio de Resistência.....	69
Quadro 9 - Rendimento do Autotransformador para o <i>FP</i> Unitário da carga.....	70
Quadro 10 - Rendimento do Autotransformador para o <i>FP</i> de 0,92 da carga	71
Quadro 11 - Rendimento Diário de um Sistema Fotovoltaico	72
Quadro 12 - Perda de Energia Diária Total em kWh do autotransformador.....	73
Quadro 13 - Energia Total Diária entregue em kWh pelo SFCR ao autotransformador.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico da Curva Característica $P \times V$	25
Gráfico 2 - Gráfico da Curva Característica $I \times V$	25
Gráfico 3 - Tensão, Corrente e Frequência do Ensaio a Vazio.	53
Gráfico 4 - Potência Ativa do Ensaio a Vazio	54
Gráfico 5 - Rendimento do Autotransformador para o FP Unitário da carga.....	70
Gráfico 6 - Rendimento do Autotransformador para o FP de 0,92 carga	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Autotrafo	Autotransformador
GD	Geração Distribuída
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
Trafo	Transformador
BT	Baixa Tensão
AT	Alta Tensão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Metodologia.....	16
2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	18
2.1 Considerações iniciais	18
2.2 Sistemas Fotovoltaicos.....	18
2.2.1 Efeito Fotovoltaico ou Geração Fotovoltaica.....	21
2.2.2 Topologias	23
2.2.3 Curva de Potência Gerada	24
2.3 Geração Distribuída	26
2.3.1 Conversão CC-CA.....	26
2.3.2 A Interface Consumidor – Rede	26
2.3.3 Medidores da Geração Distribuída	27
2.4 A problemática das Perdas na Geração	27
2.4.1 Perdas por Sujidade	27
2.4.2 Perdas por Sombreamento	28
2.4.3 Perdas por Aumento de Temperatura	28
2.4.4 Perdas nos Inversores	28
2.4.5 Perdas no Autotransformador	29
2.4.6 Demais Perdas	29
2.5 Considerações Finais	30
3 AUTOTRANSFORMADORES.	31
3.1 Considerações Iniciais	31
3.2 Revisão Teórica.....	31
3.2.1 Funcionamento	31
3.2.2 Aspectos Construtivos – Geometria e materiais (AZEVEDO, 2011)	36
3.2.2.1 Núcleo.....	36
3.2.2.2 Enrolamento	37

3.2.2.3 Material Isolante Sólido.....	38
3.2.2.4 Líquidos Isolantes.....	38
3.2.2.5 Tanques.....	39
3.2.3 Expectativa de Rendimento	39
3.2.3.1 Volume de cobre.....	40
3.2.3.2 Volume de ferro.....	41
3.2.3.3 Perdas no cobre e perdas no ferro.....	41
3.2.3.4 Regulação	42
3.2.4 Vantagens e Desvantagens	42
3.3 Autotransformadores para Interface em Sistemas Fotovoltaicos.....	43
3.3.1 ABNT NBR – Diretrizes para Projetos	43
3.3.2 Pesquisa de Mercado (Disponibilidade).....	44
3.3.3 Dados Fornecidos por Fabricantes	45
3.4 Considerações Finais	47
4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	48
4.1 Considerações Iniciais.	48
4.2 Características dos Modelo Ensaiado.....	48
4.3 Análise de Segurança.	49
4.4 Materiais.....	49
4.5 Ensaio a Vazio.....	50
4.5.1 Procedimentos do Ensaio.....	50
4.5.2 Dados medidos.	52
4.5.3 Parâmetro de Núcleo.	55
4.6 Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos e Perdas de Curto-Circuito.....	57
4.6.1 Procedimentos do Ensaio.....	57
4.6.2 Dados Medidos.	61
4.6.3 Parâmetros dos Enrolamentos.	66
4.7 Análise Comparativa do Rendimento.....	69
4.8 Considerações Finais.	74
5 CONCLUSÃO.....	76
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O transformador é um equipamento de operação estática que, por meio de indução eletromagnética, transfere energia de um circuito, chamado primário, para um ou mais circuitos denominados, respectivamente, secundário e terciário, sendo, no entanto, mantida a mesma frequência (MONTEIRO et al., 2012).

Um transformador tem o objetivo de transferir toda a potência do primário para o secundário. Na prática, observa-se certa perda de potência nessa transferência, ocasionada por diversos motivos, como a resistência dos condutores, correntes que circulam no núcleo, chamadas de correntes de *Foucault*. O trafo é constituído por no mínimo dois enrolamentos. Na maioria dos casos, esses enrolamentos são independentes entre si, mas sofrem ação do campo eletromagnético, que é mais intenso quando esses transformadores possuem um núcleo de material ferromagnético (BERTINI, 2003).

Atualmente há uma diversidade de transformadores, cada um com suas especificidades e formas de aplicação que se encaixam de acordo com a necessidade de sua utilização. Temos como exemplo, os transformadores de potência, transformadores de potencial, transformadores de corrente e os autotransformadores, sendo este último o alvo desse trabalho.

Basicamente, um autotransformador é definido como um transformador que só tem um enrolamento. Dessa forma, se todos os enrolamentos de um transformador são ligados em série, sendo em adição (ou oposição), ele pode ser considerado um autotransformador, pois nesse formato de ligação há apenas um enrolamento (KOSOW, 1982). O autotransformador não apresenta características de isolamento como no caso do transformador convencional, pois os enrolamentos do primário e secundário estão ligados eletricamente e estão sobre o mesmo eixo (ROSA, 20--).

Em algumas situações, o autotransformador dentro de um projeto de sistema elétrico de potência se torna muito interessante sob o ponto de vista técnico, onde se pode destacar seu melhor rendimento, regulação de tensão e o fator econômico, pois devido suas características construtivas o faz ter um menor custo financeiro em comparação ao transformador convencional (NASCIMENTO, 2015).

Com o grande aumento dos sistemas fotovoltaicos conectados às redes de distribuição, há um incremento no uso de autotransformadores. Os inversores CC-CA, destinados ao

condicionamento dos sinais elétricos gerados pelos módulos fotovoltaicos, apresentam, normalmente, como saída, tensões de linha e fase de 380/220 V, respectivamente. Embora existam conversores que tem como saída tensões de 220/127 V, estes são mais raros e conseqüentemente tem custo mais elevado. Neste contexto, considerando as redes de distribuição trifásicas com tensões secundárias de linha e fase de 220/127 V, o uso de autotransformadores em interface com sistemas fotovoltaicos e a instalação consumidora torna-se atrativo do ponto de vista econômico.

1.2 Justificativa

Todos os estudos realizados com autotransformadores encontrados nas literaturas afirmam que esse equipamento tem uma transformação de energia com maior rendimento e um aumento significativo na sua capacidade de transferência de potência, se comparados ao transformador convencional (ROSA, 20--).

As perdas existentes em um transformador convencional podem ser colocadas basicamente em 2 (dois) pontos: perdas fixas, relacionadas com o núcleo e as perdas variáveis, relacionadas com o cobre dos enrolamentos. Essas perdas estão diretamente ligadas com o rendimento de um transformador, uma vez que em transformadores convencionais o enrolamento do primário e o enrolamento do secundário estão separados eletricamente, havendo assim perdas na transformação por indução e a quantidade de ferro (núcleo), para suprir essa estrutura, será bem maior (KOSOW, 1982).

As características construtivas do autotransformador fazem com que o seu rendimento seja bastante elevado, maior que um transformador convencional, pois o mesmo consegue transferir uma grande parte de sua potência através da condução, já que os enrolamentos primário e secundário estão ligados eletricamente. Há também no autotransformador uma redução significativa do núcleo devido a sua estrutura, reduzindo assim as perdas no ferro ou as perdas fixas (KOSOW, 1982).

Existe também um ponto muito importante relacionado ao rendimento do autotransformador que é a relação de transformação, quanto mais perto à relação de transformação se aproxima da unidade, maior será seu rendimento (ROSA, 20--).

Neste sentido, nem toda a potência gerada pelos sistemas fotovoltaicos é entregue à carga (unidade consumidora), pois parte dessa potência é perdida no processo de conversão de energia do autotransformador.

Na aquisição de um autotransformador, encontra-se em sua placa informações sobre todos os dados relacionados ao funcionamento e eficiência desse equipamento. Neste âmbito, pretende-se nesse trabalho, verificar mediante alguns ensaios (a vazio e curto-circuito), realizados em laboratórios, o rendimento do autotransformador e o rendimento diário do autotransformador simulando as frações de carga de um sistema fotovoltaico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o rendimento de um autotransformador por meio de ensaios específicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar o ensaio a vazio para definir as perdas no núcleo do autotransformador;
2. Realizar o ensaio de curto-circuito para definir as perdas no enrolamento do autotransformador e a respectiva queda de tensão interna;
3. Verificar e analisar os resultados dos ensaios e determinar o rendimento do autotransformador em situação de carregamento diversos;
4. Analisar o comportamento do autotransformador em interface a um sistema fotovoltaico.

1.4 Metodologia

O trabalho em questão terá o foco no rendimento do autotransformador obtido por meio de ensaios característicos desse equipamento, podendo assim fazer a análise e a verificação dos resultados obtidos. Os ensaios de realização para esse trabalho serão: a vazio e o de curto-circuito.

A primeira parte do trabalho consiste em uma análise geral do estudo bibliográfico do autotransformador, levantando informações sobre o rendimento de um autotransformador, as características construtivas, vantagens e desvantagens desse equipamento e etc.

Na segunda parte serão realizados o ensaio a vazio do autotransformador para a determinação das perdas no ferro do equipamento e em seguida o ensaio de curto-circuito para a determinação das perdas nos enrolamentos.

Na terceira parte, com o resultado dos ensaios no autotransformador, serão realizados cálculos para a determinação do rendimento do equipamento em diversos níveis de frações de cargas.

Na quarta parte, será feita a análise do comportamento do autotransformador, simulando sua conexão a um sistema fotovoltaico conectado à rede, estimando as perdas ocasionadas pela potência perdida no processo de conversão das tensões e correntes elétricas.

2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

2.1 Considerações iniciais

O crescente avanço da indústria juntamente com o aumento na demanda por energia, visando também a sustentabilidade do meio ambiente e formas diferentes para a matriz energética, as fontes renováveis, como a solar, têm sido impulsionadas como geração de energia (NASCIMENTO, 2017).

As fontes renováveis, solar e eólica principalmente, tem se expandido e se tornado cada vez mais competitivas, resultante da diminuição dos custos devido ao ganho de escala e do desenvolvimento tecnológico, embora elas, inicialmente, sejam mais caras (NASCIMENTO, 2017).

De uma forma geral, a geração distribuída tem se tornado uma opção muito relevante para o setor elétrico, dados os fatores econômicos, tecnológicos e ambientais que tem alavancado o desenvolvimento dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (CARVALHO, 2012).

A geração distribuída advinda da fonte renovável utilizando-se de células fotovoltaicas tem ganhado muitos usuários ao redor do mundo (CARVALHO, 2012). A resolução normativa 482/2012, publicada pela ANEEL (ANEEL, 2012), regula a micro e minigeração no Brasil que juntamente com os altos índices de radiação solar do território brasileiro, revelam um ambiente favorável ao aumento dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

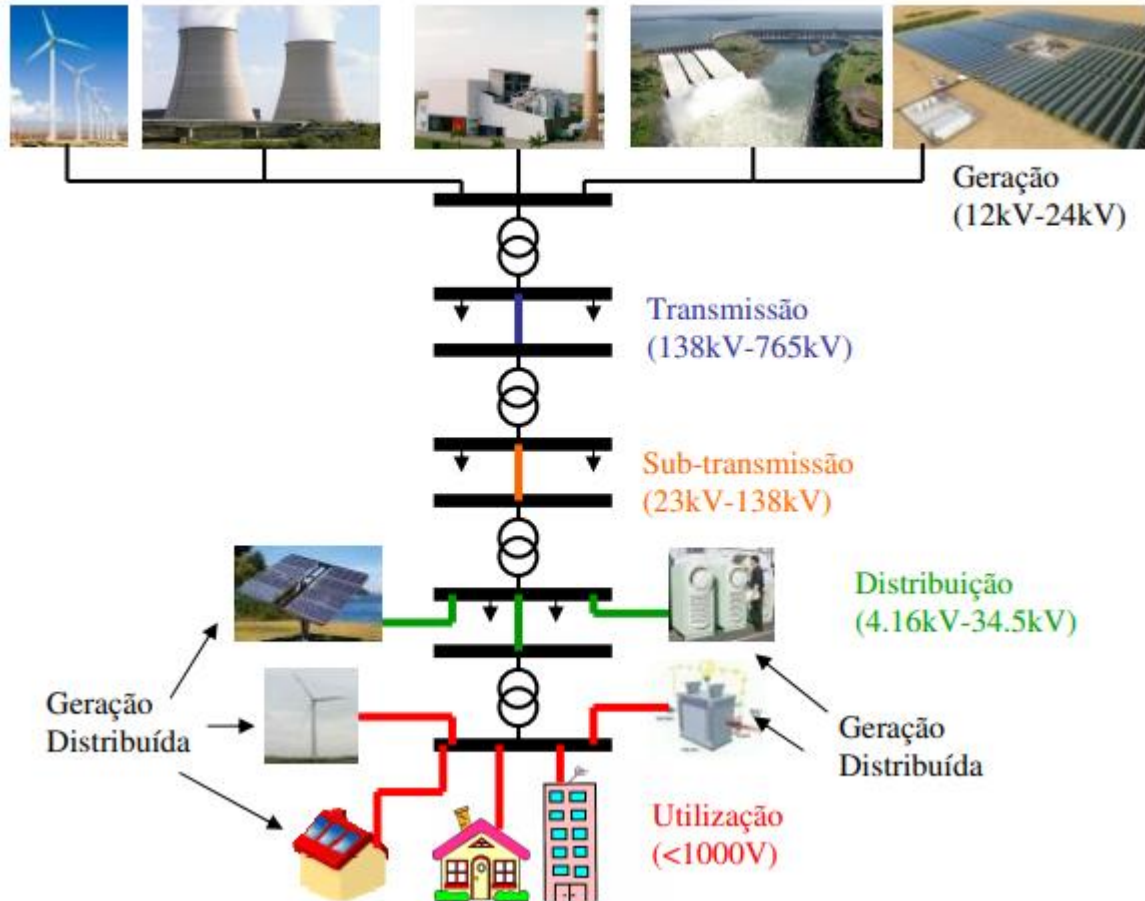
2.2 Sistemas Fotovoltaicos

De acordo com o Decreto nº 5.163, de 2004 (ANEEL, 2004), geração distribuída (GD) é uma unidade geradora de energia elétrica próxima ao local de carga, interligado ao sistema de distribuição ou ligado diretamente ao consumidor, de natureza não despachada e que utilize geração proveniente de fontes renováveis ou empreendimento hidroelétrico com potência instalada inferior a 30 MW ou cogeração com eficiência energética maior ou igual a 75%.

Como a geração distribuída normalmente é instalada no local de consumo e pelo consumidor e não é, a via de regra, gerida pelas empresas distribuidoras, o fluxo de carga deixa de ser unidirecional e passa a ser bidirecional, modificando o sistema elétrico de potência

tradicional (CARVALHO, 2012). Na figura 1, pode ser visto um sistema elétrico de potência com geração distribuída.

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência com Geração Distribuída



Fonte: Carvalho (2012)

Uma das principais tecnologias incluídas no sistema de geração distribuída é a energia solar fotovoltaica, que se utiliza de células em módulos fotovoltaicos para poder gerar energia elétrica por meio da radiação solar.

Pode-se definir como sistema fotovoltaico o conjunto de módulos fotovoltaicos, juntamente com outros componentes que integram esse sistema, produzidos para realizar a conversão de energia solar em energia elétrica, de acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2002).

Desde a década de 70, durante o início da crise do petróleo, acontece um contínuo desenvolvimento do sistema de geração fotovoltaico e hoje representa um ponto viável de produção de energia a partir desta fonte. Sua utilização pode ser realizada tanto em perímetro urbano quanto em ambientes mais afastados, como a zona rural (GAMA et al, 2013).

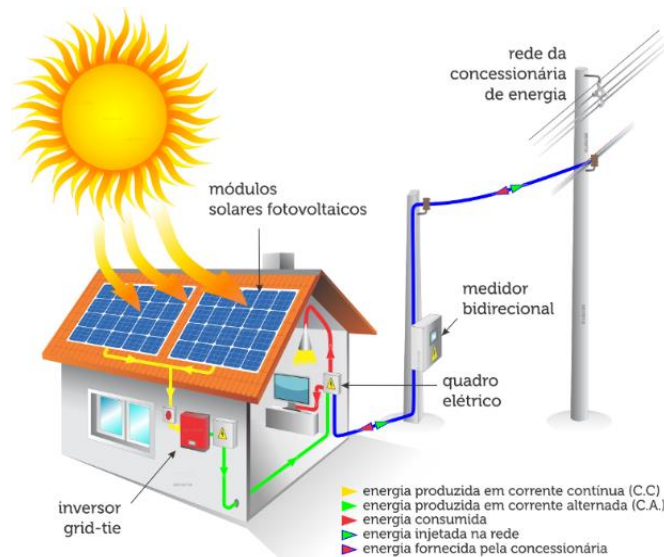
Hoje, no Brasil, a energia fotovoltaica conectada à rede é constituída de 344,406 mil micros e mini usinas e tem uma potência instalada de 4168 mega watts (MW) (ANEEL, 2020).

A escolha dos componentes (módulos, inversor, controlador de carga, baterias e etc) que serão integrados varia de acordo com a classificação, a principal diferença entre os sistemas isolados e os não isolados é a existência ou não de um sistema acumulador de energia (baterias). A figura 2 mostra a ilustração de um sistema fotovoltaico completo conectado à rede.

De acordo com o que foi visto e analisado sobre um sistema fotovoltaico, classificou-se o mesmo em quatro subgrupos, são eles:

- a) Sistemas isolados domésticos fornecem energia para as residências que não são conectados à rede de distribuição;
- b) Sistemas isolados não domésticos fornecem energia para serviços específicos como refrigeração de medicamentos, telecomunicação, iluminação pública, entre outros;
- c) Sistemas distribuídos conectados à rede são instalados para atender um determinado consumidor, que utiliza a energia gerada para complementar o fornecimento de energia convencional;
- d) Sistemas centralizados conectados à rede elétrica, nesse caso a energia gerada não é vinculado a um consumidor específico, pois exercem o mesmo papel das grandes unidades de geração como térmicas, nucleares e hidrelétricas;

Figura 2 - Sistema Solar Fotovoltaico Completo



Fonte: <https://luzsolar.com.br/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico/>

Outra forma de nomear os tipos de sistemas fotovoltaicas são: *On-Grid* e *Off-Grid*. *On-Grid* para sistemas conectados à rede e *Off-Grid* para sistemas não conectados à rede.

2.2.1 Efeito Fotovoltaico ou Geração Fotovoltaica

O sistema fotovoltaico, constituídos por módulos fotovoltaicos, e por sua vez, células fotovoltaicas, são os responsáveis por converter a radiação solar em eletricidade (SEVERINO, 2008). As células fotovoltaicas possuem a menor dimensão por unidade em um sistema fotovoltaico. Esses módulos são produzidos com potências de 50Wp até 500Wp (CARVALHO, 2012).

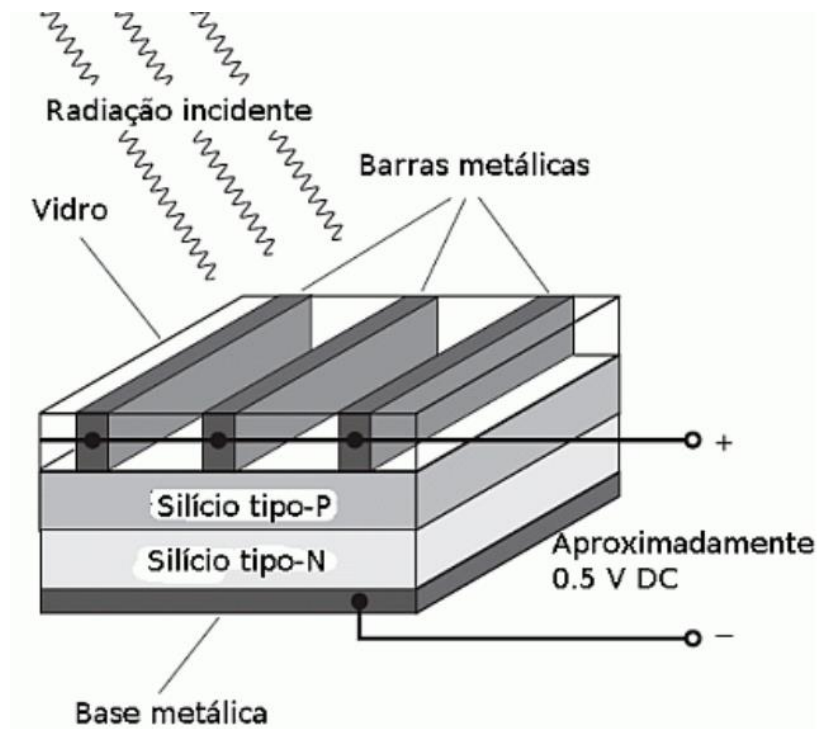
O semicondutor mais utilizado na fabricação das células fotovoltaicas é o silício (Si), e isso ocorre porque além de ser um elemento abundante na crosta terrestre, seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons em sua camada de valência, que formam uma rede cristalina quando se liga aos átomos vizinhos. (JANNUZZI et al, 2009)

Quando se adiciona (dopa) átomos com cinco elétrons de ligação ao silício, resulta em um elétron em excesso, sofrendo assim uma fraca atração exercida pelo seu núcleo. Devido a essa fraca ligação esse elétron possui uma maior facilidade de se deslocar da camada de valência para a camada de condução, mesmo que com pouca incidência térmica. Sendo assim os doadores de elétrons são denominados de dopante p (CARVALHO, 2012).

Entretanto, se doparmos o silício com átomos de três elétrons na camada de valência, há a falta de um elétron para satisfazer as ligações de átomos da rede (oito elétrons) essa falta é denominada de lacuna. Quando há incidência térmica, um elétron vizinho passa a preencher essa lacuna, havendo um deslocamento, passando a ser um aceitador de elétron ou dopante n (CARVALHO, 2012).

A figura 3 mostra a representação da estrutura de uma célula fotovoltaica.

Figura 3 - Representação da Estrutura de uma Célula Fotovoltaica



Fonte: Alves (2016)

Ao combinar as duas impurezas no mesmo cristal de silício formam-se a junção p-n, onde na área de contato dessa junção os elétrons livres do dopante n fluem para as lacunas do dopante p, formando um fluxo de elétrons. Esse processo químico citado acima por Carvalho (2012) é a forma pela qual o módulo fotovoltaico gera energia elétrica.

As células fotovoltaicas mais utilizadas podem ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. Essa diferença na constituição dos módulos gera uma diferença do rendimento dos mesmos no sistema fotovoltaico (SILVA et al, 2018).

A célula de silício monocristalino é a tecnologia mais antiga e possui uma alta eficiência dentre as que são utilizadas comercialmente como conversor direto de energia solar em eletricidade. Os módulos formados por essas células possuem um único cristal de silício puro fatiado de forma individual e tipicamente arredondada, possuem cor uniforme e podem ser diferenciados visualmente.

Tanto o módulo monocristalino como o policristalino são formados de silício, sua diferenciação está na forma como é feita a fundição dos cristais, pois os módulos constituídos de células policristalinas são fundidos em blocos preservando a formação dos múltiplos cristais.

As placas são cortadas em forma quadrada e geralmente menos eficientes, mas que por ter uma fabricação menos complexa se torna mais barato e competitivo no mercado.

A terceira opção mais utilizada no mercado é o módulo constituído de silício amorfo que é fabricado por meio da deposição de diversos substratos. Essa tecnologia comparada as outras duas é a que tem um menor custo, além disso, tem-se a possibilidade de fabricação de células com grandes áreas e baixo consumo de energia na produção (ARAÚJO, 2016).

2.2.2 Topologias

Os componentes que integram o sistema fotovoltaico variam de sistema para sistema dependendo da sua aplicação, como no caso de sistemas conectados à rede que por entregarem ao consumidor e/ou a rede elétrica toda a energia gerada não necessitam de elementos para armazenar energia (CARVALHO, 2012).

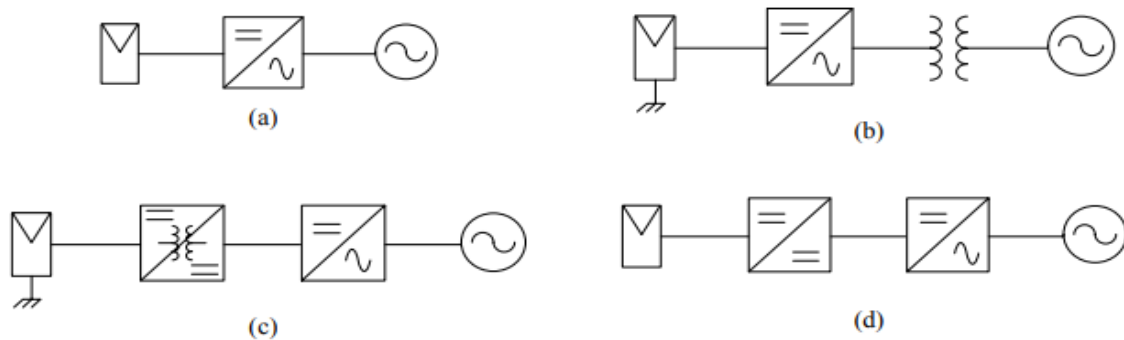
Os principais itens dos SFCR's são os módulos fotovoltaicos, agrupados em arranjos, e os inversores CC-CA. Alguns outros componentes são utilizados em outras topologias como transformadores e conversores CC-CC (LACERDA, 2010). A figura 4 mostra a representação dos tipos de tipologias do SFCR.

Tem-se que a combinação desses elementos formam quatro possíveis topologias:

- a) Sistema de único estágio com inversor não isolado, dentre as que serão apresentadas essa é a configuração de processamento de energia fotovoltaico mais simples, pois é formada por um único inversor fazendo a ligação direta entre os módulos e a rede elétrica.
- b) Sistema de único estágio com inversor isolado, diferente da topologia apresentada anteriormente esse sistema apresenta um transformador de núcleo de ferro-silício entre o inversor e a rede, constituído assim um sistema isolado. Além de aumentar a segurança desse sistema, o transformador pode atuar na corrente de saída como filtro para os harmônicos.
- c) Sistema de múltiplos estágios de conversão com isolamento, nessa topologia o conversor CC-CC é isolado com um transformador (com núcleo de ferrite) de alta frequência, isso propicia a proteção dos módulos e adequação do nível de tensão que será aplicada na entrada do inversor.

- d) Sistema de múltiplos estágios de conversão sem isolamento, nesse caso o conversor CC-CC é responsável pelo rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) e pela elevação de tensão da saída dos módulos.

Figura 4 - Representação dos Tipos de Tipologias



Fonte: Carvalho (2012)

2.2.3 Curva de Potência Gerada

Tendo conhecimento a respeito das características estruturais dos módulos fotovoltaicos, o próximo passo é saber quais são as principais características elétricas e quais os fatores os influenciam, sendo os mais relevantes os que estão descritos abaixo:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): Quando o módulo não fornece potência, ou seja, a tensão de saída quando a corrente de saída é nula;
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): Na ocorrência de curto-circuito, ou seja, a corrente de saída quando a tensão de saída do módulo é nula;
- Potência máxima gerada (P_m): A máxima potência gerada pelo módulo;
- Tensão de potência máxima (V_{mp}): Tensão de saída do módulo quando a máxima potência está sendo gerada pelo módulo;
- Corrente de potência máxima (I_{mp}): Corrente de saída do módulo quando a máxima potência está sendo gerada pelo módulo.

As curvas características do módulo mediante condições pré-determinadas são conhecidas como *standard test conditions* (STC) que consistem em referências usadas nas medições, para fatores que podem influenciar no comportamento elétrico dos módulos. A curva de potência versus tensão e corrente versus tensão são curvas características típicas e é por meio delas que se pode determinar a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito e a corrente

no ponto de máxima potência (CARVALHO, 2012). Nos gráficos 1 e 2 se pode observar as duas curvas características típicas:

Gráfico 1 - Gráfico da Curva Característica P_xV

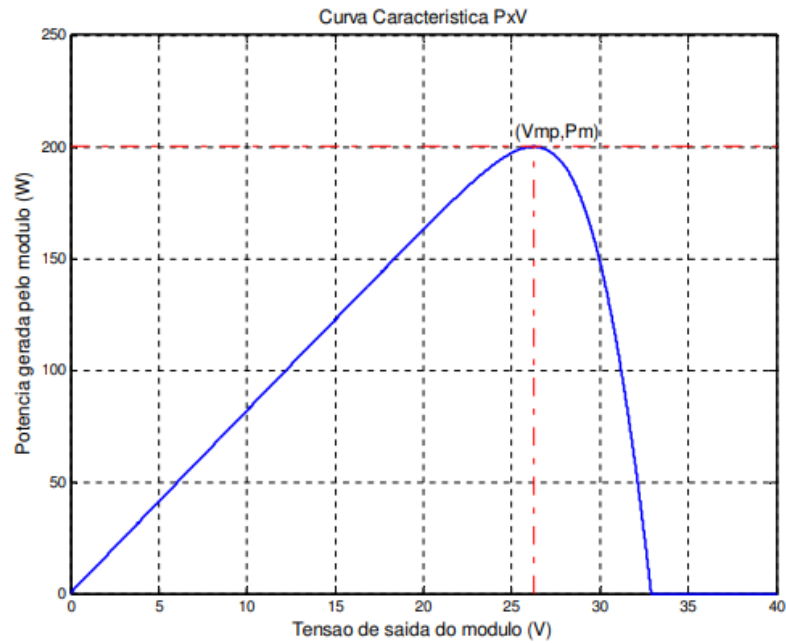
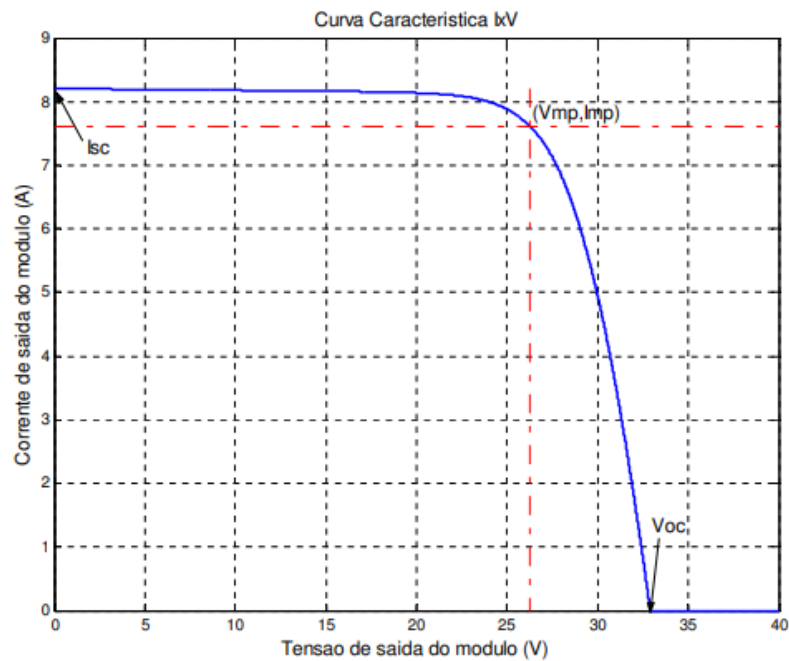


Gráfico 2 - Gráfico da Curva Característica I_xV



Segundo Casaro (2008), os fatores que influenciam os parâmetros elétricos são:

- Intensidade luminosa (P_{sn}): é a densidade de potência da irradiação solar dada em kW/m^2 , e influencia linearmente na corrente que será gerada pelos módulos. Condições padronizadas: 1kW/m^2 ;
- Temperatura de célula (T): é a temperatura do ambiente no qual os módulos se encontram, tendo que quanto há um aumento na temperatura ambiente há uma redução na eficiência dos mesmos porque reduz a potência máxima gerada. Condições padronizadas: 25°C ;
- Radiação de massa de ar (AM): essa grandeza se refere a quantidade de atmosfera que é atravessada pela luz do sol. Condições padronizadas: $48,2^\circ$.

2.3 Geração Distribuída

2.3.1 Conversão CC-CA

Os conversores utilizados em SFCR são em sua maioria do tipo auto comutados com chaveamento em alta frequência. Por meio desses conversores tem-se o controle dos harmônicos de corrente de saída, controle do fator de potência e outros fatores que por meio da tecnologia digital são possíveis de serem controlados (IEEE, 2000).

No SFCR são utilizados os inversores de fonte de tensão conhecido como *Voltage Source Inverter (VSI)*, que possui componentes conectados ao lado CC cujas características são uma fonte de tensão CC, o controle pode ser feito para controlar a tensão ou a corrente de saída, utilizando o sinal da rede como referência de sincronismo (DAHONO, 1997).

As maiorias dos inversores que atuam no SFCR operam com o fator de potência unitário, e não se comportam como geradores convencionais, pois não possuem inércia e respondem imediatamente a mudanças no sistema de potência.

2.3.2 A Interface Consumidor – Rede

Na geração distribuída a partir de sistemas fotovoltaicos, existe a relação entre o que é injetado e como essa energia irá interagir com o sistema alimentador. Por muitas vezes, e de formar a melhorar a interface consumidor-rede, o uso de um conversor CC-CA não é o único equipamento a contribuir com essa relação.

O autotransformador por vezes é utilizado em SFCR's, pois, como foi dito em alguns tópicos acima, existem lugares no Brasil em que as redes de distribuição são projetadas para que as tensões de linha e fase atue em 220/127 V. Em sua maioria, os SFCR's são constituídos por inversores que trabalham com tensões 380/220 V, dessa forma, se faz necessário o uso de autotransformadores para adequar os diferentes níveis de tensões dantes mencionados.

2.3.3 Medidores da Geração Distribuída

De acordo com a ANEEEL (2016), o sistema de medição deve atender às especificações exigidas para unidades consumidoras conectadas no mesmo nível de tensão de uma mini ou microgeração, mas tem a necessidade de acrescentar um medidor bidirecional de energia elétrica, além de que esse deve ser homologado pelo INMETRO.

A medição bidirecional é possível também utilizando dois medidores unidirecionais, um para medir a energia injetada pelo sistema fotovoltaico e outro para medir a energia elétrica ativa que é consumida.

2.4 A problemática das Perdas na Geração

Para que se tenha o melhor desempenho no sistema fotovoltaico a ser instalado é primordial que alguns fatores sejam analisados na hora de elaborar o projeto, assim como após a instalação que deve ser feita em um local com boa incidência solar sem a presença de sombreamento. São necessárias inspeções periódicas para que os módulos fotovoltaicos operem devidamente.

Alguns dos principais fatores de perdas nas instalações estão descritos abaixo:

2.4.1 Perdas por Sujidade

As perdas por sujidade referem-se ao acúmulo de sujeira sobre os módulos e reduzem a incidência solar direta nos módulos, reduzindo o desempenho do sistema. Em áreas industriais, com grande tráfego de automóveis, ou com o clima seco, por exemplo, são locais mais propícios para que haja um maior acúmulo de sujeira.

Em instalações residenciais recomenda-se que seja feita limpeza periodicamente, entretanto, em muitas instalações o que ocorre nesses módulos é apenas a autolimpeza (limpo com água da chuva) que por causa da angulação de 10° é suficiente para que isso ocorra.

2.4.2 Perdas por Sombreamento

O SFCR atinge o nível mais alto em eficiência quando os módulos fotovoltaicos são igualmente iluminados. Na presença de um sombreamento, parcial ou total, sejam por árvores, prédios ou até mesmo por outros arranjos fotovoltaicos, a corrente e potência gerada por esse sistema serão a partir do módulo de menor quantidade de radiação.

Segundo Araújo (2016), um dos pontos mais significativos em relação às perdas de um sistema fotovoltaico é o sombreamento parcial, que tem por nome efeito *hot spot*, onde ela atua como uma carga no sistema, que resulta em aquecimento excessivo e possivelmente uma destruição do módulo. Para que isso seja corrigido implanta-se um diodo de *by-pass* entre as células, possibilitando assim que não haja aquecimento das mesmas. Por outro lado, esse procedimento faz com que o sistema perca parte do seu rendimento igualando-se ao rendimento da área sombreada. Esse caso se agrava ou se ameniza quando os módulos estão ligados série ou paralelo.

2.4.3 Perdas por Aumento de Temperatura

Segundo Almeida (2012), a potência do gerador fotovoltaico cai entre 0,3 e 0,4% a cada aumento de 1°C. Devido ao fato de que os painéis fotovoltaicos eventualmente não operam em locais que apresentam a mesma temperatura para a qual tiveram os ensaios em laboratório, que são as condições ideais para o seu funcionamento, quando há a elevação de temperatura tem como consequência há queda na sua potência.

2.4.4 Perdas nos Inversores

Os inversores recebem a energia elétrica em corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos e a converte em corrente alternada para que possa ser usada pelos equipamentos em geral e injeta na rede elétrica caso haja excedentes dessa energia, ou seja, a eficiência

apresentada pelo inversor está diretamente ligada com suas características construtivas, fazendo com que já existam perdas iniciais de potências ligadas a esse equipamento.

Na transformação de CC para CA, existe no interior do inversor um processo de chaveamento constituído pelos semicondutores que fazem a condução e a não condução do sinal de entrada deixando a forma de onda no modo senoidal, com tensão e frequência compatíveis com a rede e eletrodomésticos usuais. Entretanto, na conversão do sinal CC-CA algumas anomalias que são chamadas de harmônicos são produzidas e fazem com que a eficiência do inversor sofra uma leve queda no seu rendimento. Além disso, no próprio processo de chaveamento já existem perdas de energia, fazendo com que a eficiência diminua.

2.4.5 Perdas no Autotransformador

Em comparação à transformadores convencionais, as perdas existentes em autotrafos são bem menores, o que conseqüentemente gera um rendimento final maior. No entanto, apesar das perdas nesse equipamento serem pequenas, em interface a um sistema fotovoltaico essas perdas podem ser tornar significativas e reduzirem a potência entregue à carga.

Basicamente, o autotrafo apresenta dois tipos de perdas ativas: As perdas fixas que são aquelas relacionadas com o núcleo do equipamento e as perdas variáveis, que são aquelas relacionadas com o cobre (KOSOW, 1982). Ainda segundo Kosow (1982), esses dois tipos de perdas existem, pois, como o autotransformador não tem a separação elétrica entre o primário e o secundário, ele passa a ser menos robusto que um trafo convencional, sendo assim, há a diminuição do núcleo e do tamanho da sua bobina.

Segundo Nascimento (2015), existe outro aspecto ligado ao rendimento do autotransformador que é a relação de transformação: Quanto mais perto de 1 a relação de transformação, maior o rendimento do autotransformador. Esse fato está ligado diretamente à questão das perdas do equipamento, pois, de acordo com os aspectos em que o autotrafo for utilizado, a relação de transformação pode ser bastante elevada, fazendo assim cair o seu rendimento.

2.4.6 Demais Perdas

- Perdas na fiação elétrica (conectores e condutores);

- Degradação dos painéis: expostos a agressividade do clima, sendo uma deterioração de forma gradual;
- Corrosão: o sódio presente no vidro reage com a umidade e isso resulta na corrosão principalmente nas bordas dos painéis;
- Descasamento dos módulos (*Mismatch*): levando-se em consideração as duas configurações que os interligam: série ou paralelo. A configuração escolhida irá depender das condições requisitadas, e a incompatibilidade entre características de módulos acarreta na perda por descasamento dos módulos.
- PID (*Potential Induction Degradation*) é a perda de potência devido à alta tensão;
- LID (*Light Induced Degradation*) é a degradação induzida pela luz durante as primeiras horas de exposição ao sol.

2.5 Considerações Finais

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede estão sendo utilizados cada vez mais nos dias atuais, pois o fato de ser uma energia renovável, que durante o processo de operação não gera resíduos que possam afetar o meio ambiente e que traz independência na produção de energia para o seu usuário, tem tornado essa tecnologia cada vez mais atrativa.

Existem vários aspectos que são levados em conta para que a instalação de um sistema fotovoltaico seja compensatória para o investidor. A irradiação solar, a potência dos módulos, o inversor, a configuração de rede a qual está conectado, autotransformadores entre outros pontos são de extrema relevância para o rendimento do sistema fotovoltaico. Em todo o processo de conversão da energia solar em energia elétrica existem perdas da potência entregue as cargas ocasionadas pelos equipamentos utilizados nesse sistema.

O presente trabalho dará ênfase nos estudos das perdas de transformação de um autotransformador em interface a um sistema fotovoltaico conectado à rede.

3 AUTOTRANSFORMADORES.

3.1 Considerações Iniciais

Quando se fala de sistemas elétricos de potência, existem vários equipamentos importantes que o formam, entre eles, o transformador. O transformador funciona utilizando-se o princípio da indução mútua entre duas ou mais bobinas, ou circuitos indutivamente acoplados (KOSOW, 1982).

Apesar da larga utilização do transformador convencional, o autotransformador tem se mostrado, em algumas aplicações, uma opção viável do ponto de vista técnico-econômico, destacando-se o melhor rendimento e a regulação de tensão do equipamento. O fator econômico também é um ponto muito importante a ser visto, já que, devido às características construtivas do autotransformador ter um custo menor em relação ao trafo convencional (NASCIMENTO, 2015).

O uso do autotransformador, no entanto, necessita de maiores cuidados em relação a sua proteção, pois, diferente do transformador convencional, o primário e o secundário não são isolados eletricamente. Devem-se observar também as características operacionais projetadas para o sistema elétrico onde será utilizado (NASCIMENTO, 2015).

3.2 Revisão Teórica

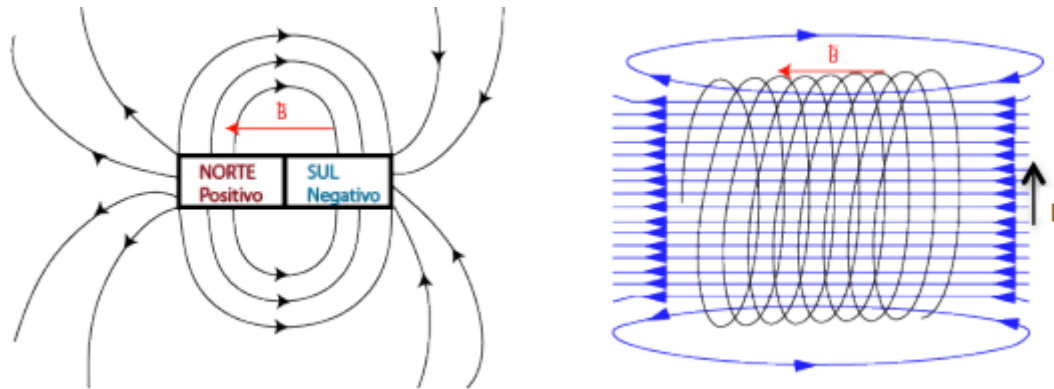
3.2.1 Funcionamento

Segundo John (1994), um autotransformador poder constituído de um transformador convencional apenas realizando uma ligação elétrica entre os seus enrolamentos. As características construtivas do autotransformador se assemelham ao do transformador de potência, se diferenciando em apenas um ponto, o autotransformador possui apenas um enrolamento em torno de um único núcleo ferromagnético.

De acordo com Kosow (1982), o funcionamento do transformador acontece segundo o princípio da indução mútua (Lei de Faraday e lei de Lenz) entre duas ou mais bobinas indutivamente acopladas. O autotransformador também obedece ao mesmo princípio de funcionamento do trafo convencional.

Toda carga elétrica tem ao seu redor um campo elétrico, que pode ser demonstrado através linhas de campos que saem (carga positiva) e entram (carga negativa) por ela. De forma parecida à carga elétrica, um campo eletromagnético (B) pode ser representado por linhas de campos quando se tem um ímã ou uma carga em movimento, observando que, essas linhas saem do polo norte (positivo) e entram no polo sul (negativo), como está representado na figura 5.

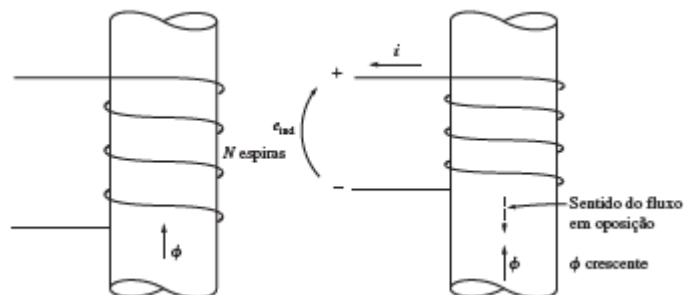
Figura 5 - Representação das Linhas de Campo Magnéticas



Fonte: http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/lei_transf_3.pdf.

Pode se dizer que, um campo eletromagnético está sempre ligado a uma carga em movimento, por exemplo, no caso de uma espira, quando há corrente atravessando-a, gerará ao seu redor um campo magnético que, se colocada próximo a um ímã, resultará em uma interação chamada de força magnética (f) e fará com que essa espira rotacione. Se há variação de uma corrente (corrente alternada) que passa por fio, haverá ali a produção de um campo magnético variável, obedecendo assim a primeira lei do eletromagnetismo (KOSOW, 1982). Na figura 6 pode-se observar a representação da lei Lenz.

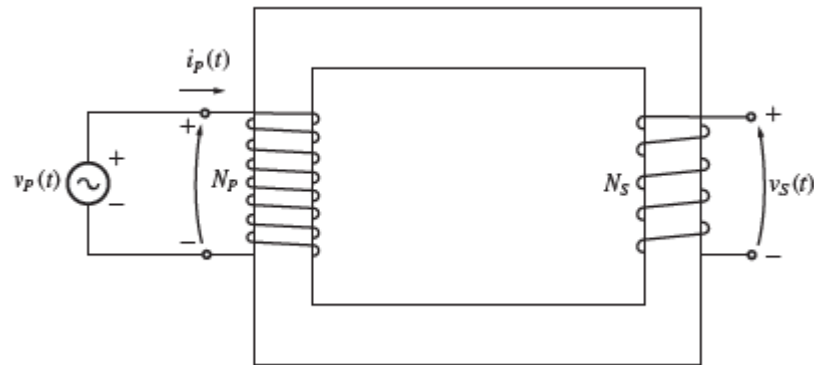
Figura 6 - Representação da Lei de Lenz



Fonte: Chapman (2000)

Um transformador é constituído basicamente por duas ou mais bobinas de fios (separadas eletricamente), enroladas fisicamente ao entorno de um núcleo ferromagnético comum aos enrolamentos. A bobina de um lado do núcleo é chamada de primário e a outra bobina formada no outro lado do núcleo é chamada de secundário (CHAPMAN, 2000), como mostra a figura 7.

Figura 7 - Diagrama Esquemático de um Transformador



Fonte: Chapman (2000)

Onde: $V_p(t)$ é a tensão do primário;

$I_p(t)$ é a corrente do primário;

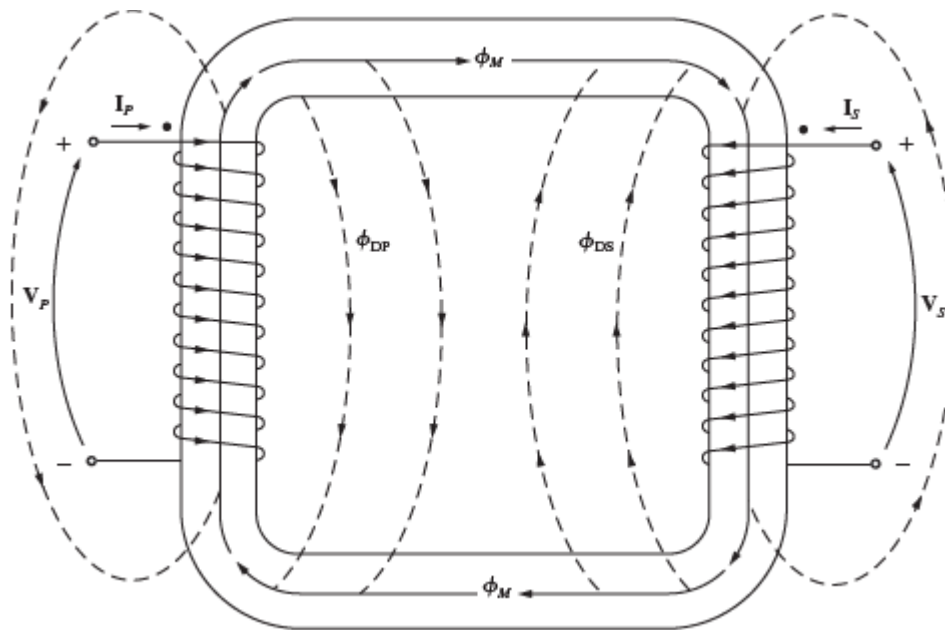
$V_s(t)$ é a tensão do secundário;

N_p é número de espiras do primário;

N_s é o número de bobina do secundário.

Quando a corrente alternada passa pelo fio da bobina do primário, essa acaba produzindo um campo magnético que, por causa do núcleo ferromagnético, as linhas de campos não se dispersam totalmente no ar, mas acabam sendo concentradas no centro do núcleo, formando um fluxo magnético que é levado até a bobina do secundário do transformador, como sugere a ilustração da figura 8. Quando o fluxo magnético atravessa a bobina do secundário é induzida uma corrente alternada nesse enrolamento, alimentando assim a carga instalada a esse transformador (NASCIMENTO, 2015).

Figura 8 - Fluxo Concatenado e Mútuo em Núcleo de Transformador



Fonte: Chapman (2000)

Onde: V_p corresponde a tensão no primário;

V_s corresponde a tensão no secundário;

I_p corresponde a corrente no primário;

I_s corresponde a corrente no secundário;

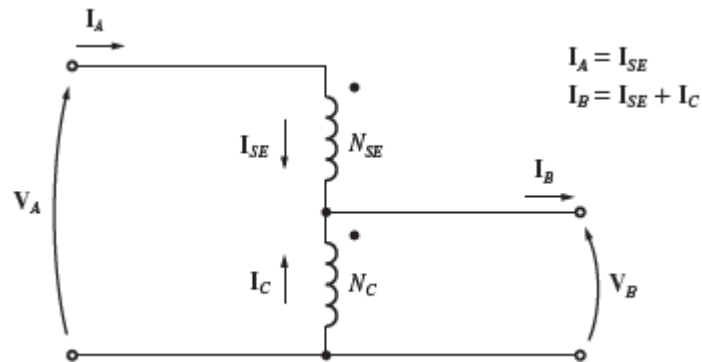
ϕ_M corresponde ao fluxo no núcleo;

ϕ_{DP} corresponde ao fluxo no primário;

ϕ_{DS} corresponde ao fluxo no secundário.

O autotransformador tem o princípio de funcionamento igual ao do transformador convencional, obedecendo ao princípio da Lei de Faraday. No entanto, como dito anteriormente, o autotransformador possui apenas um enrolamento em volta de um único núcleo ferromagnético, ou seja, além da transferência de energia acontecer por acoplamento mútuo (indução magnética), a maior parte acontece por meio da ligação elétrica direta, já que, o primário e o secundário estão conectados eletricamente, como ilustra a figura 9.

Figura 9 - Diagrama de um Autotransformador Abaixador



Fonte: Chapman (2000)

Os autotransformadores podem ser utilizados de duas formas distintas, como elevador ou abaixador. O que define essa configuração é o lado onde a potência é aplicada no circuito, ou seja, o primário do autotransformador. Se a potência for aplicada no lado de alta tensão (AT), ele será utilizado como abaixador, mas se a potência for aplicada no lado de baixa tensão (BT), ele será utilizado como elevador (CHAPMAN, 2000).

O autotransformador abaixador pode ser muitas vezes confundido com um divisor de tensão, o que é um equívoco, pois, se realizada a análise dos fluxos de correntes da figura 9, pode-se afirmar que, I_B é a soma das correntes I_A ($I_A = I_{SE}$) com a corrente I_C e isso difere um autotransformador de um simples divisor de tensão.

Na figura 9 pode-se observar que:

$$I_B = I_A + I_C \quad (1)$$

A equação (1) pode ser provada quando fazemos a análise das potências de entrada e saída do circuito, com isso, temos:

$$P_1 = P_2 \quad (2)$$

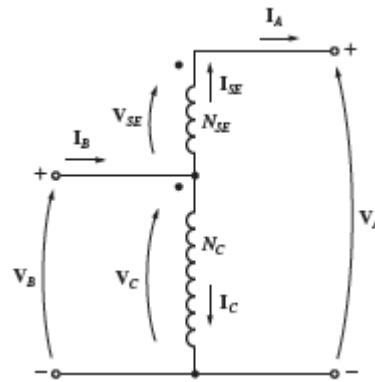
$$V_1 * I_1 = V_2 * I_2 \quad (3)$$

Onde: P_1 é a potência de entrada;

P_2 é a potência de saída.

Como $V_2 < V_1$, então, necessariamente $I_2 > I_1$.

Figura 10 - Diagrama de Autotransformador Elevador



Fonte: Chapman (2000)

No autotransformador elevador da figura 10, a análise das potências mostra que $V_2 > V_1$, com isso $I_2 < I_1$, dessa forma, o fluxo de corrente para essa configuração é demonstrado na equação (4).

$$I_A = I_B + I_C \quad (4)$$

3.2.2 Aspectos Construtivos – Geometria e materiais (AZEVEDO, 2011)

Transformadores convencionais e autotransformadores tem basicamente a estrutura magnética idêntica, podendo a vir ter partes específicas adicionais de acordo com a necessidade do seu uso.

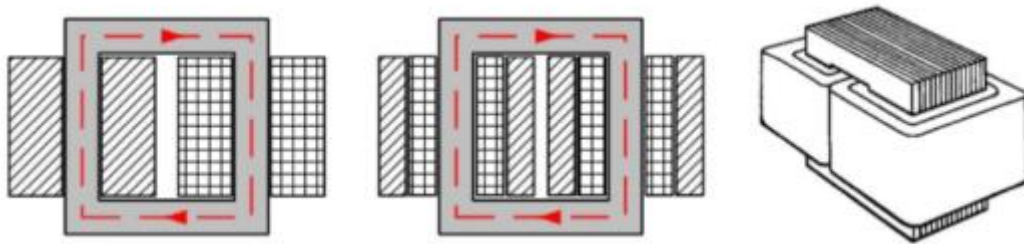
Geralmente os autotransformadores monofásicos e trifásicos são construídos utilizando-se os seguintes aspectos: Parte ativa, com núcleo, enrolamento e material isolante sólido, e a carcaça. Na maioria dos casos, os autotrafos não utilizam um líquido isolante, devido ao fato de seus rendimentos serem altos e com isso as suas perdas serem baixas, eliminando assim uma das funções do óleo.

3.2.2.1 Núcleo

Uma das partes mais importantes do autotransformador é o núcleo, que normalmente é constituído por uma liga de ferro-silício no formato laminar, sendo mais comum a padronização “E” e “I” para a sua utilização.

O núcleo pode ser apresentado de duas formas distintas, sendo a primeira chamada de núcleo envolvido, onde os enrolamentos são colocados de forma a envolver o circuito magnético, ou o ferro do autotransformador, como pode ser observado na figura 11.

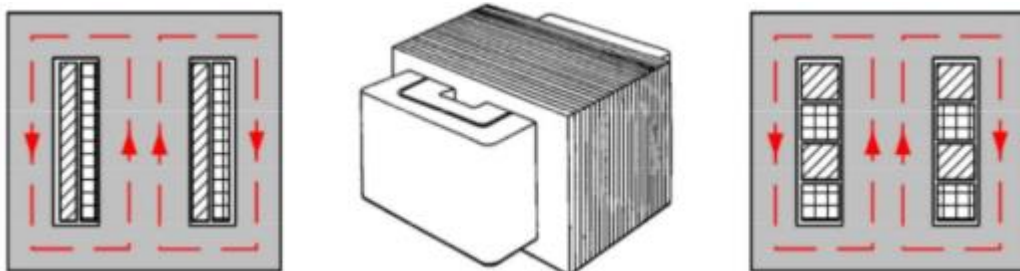
Figura 11 - Núcleo Envolvido



Fonte: Azevedo (2011)

A segunda forma como o núcleo pode ser apresentado chamasse núcleo envolvente, que diferente do primeiro, o circuito magnético ou o ferro do transformador envolve os enrolamentos, como pode ser observado na figura 12.

Figura 12 - Núcleo Envolvente



Fonte: Azevedo (2011)

3.2.2.2 Enrolamento

Os enrolamentos, que também são chamados de bobinas, são fios produzidos a partir do cobre com seção circular ou retangular. Existem dois tipos de enrolamentos, o de baixa tensão (BT) e o de alta tensão (AT), que geralmente são colocados de forma concêntrica ao núcleo, ou seja, ao redor de uma das partes (Perna) do núcleo, sendo que, a bobina de baixa tensão (BT)

ocupa a parte mais interna ou mais próxima do ferro, enquanto que a bobina de alta tensão (AT) ocupa a parte mais externa do ferro, sobrepondo a bobina BT.

A bobina de alta (AT) é geralmente colocada na parte mais externa do ferro pelo fato de que, por conter o maior número de espiras, pode ser dividida em várias outras pequenas bobinas de números menores de espiras, podendo assim manter uma facilidade para manutenções futuras, melhor forma de isolamento e poder separar algumas derivações para conexão a um comutador (TAP), como mostra a figura 13.

Figura 13 - Enrolamento de Baixa Tensão (a) e Enrolamento de Alta Tensão (b)



Fonte: Azevedo (2011)

3.2.2.3 Material Isolante Sólido

Materiais como papel isolante, papelão e madeira são utilizados de forma a isolar os fios do lado de baixa tensão do lado de alta tensão e isolar um grupo de bobinas do outro. Essas isolações acabam por evita perdas de energia e facilitam o manuseio do equipamento.

3.2.2.4 Líquidos Isolantes

Basicamente, alguns transformadores e autotransformadores são construídos de forma que necessitam serem submersos em óleos isolantes no intuito de que esse líquido exerça duas funções: Isolar o circuito magnético e transferir para o tanque ou carcaça o calor gerado das perdas do equipamento pela parte ativa.

Para garantir alta rigidez dielétrica e boa fluidez e conseguir realizar suas funções, o óleo deve está livre de humidade e outras impurezas. Para a maioria dos transformadores e autotransformadores, o óleo mineral utilizado é de origem mineral.

3.2.2.5 Tanques

Autotransformadores e Transformadores trifásicos são protegidos pelo o que é chamado de tanque ou carcaça, onde são alocados as partes ativas e o óleo isolador quando utilizado. O tanque é responsável por dissipar o calor proveniente das perdas de energia que acontecem nos trafos e nos autotrafos.

Por muitas vezes, de acordo com o calor que a energia das perdas gera, as carcaças desses equipamentos podem ser lisas, nervuradas ou revestidas de radiadores.

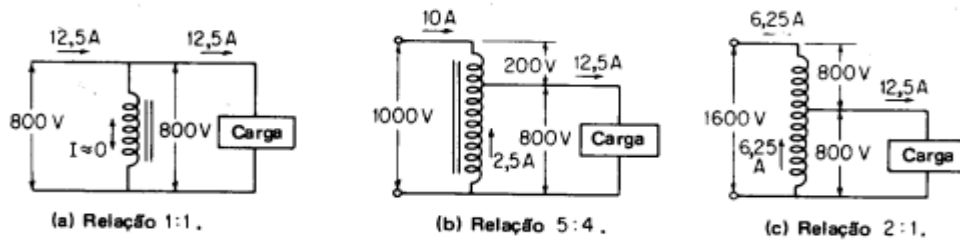
3.2.3 Expectativa de Rendimento

Quando se trata de um transformador real tem-se que o seu rendimento é considerado elevado seja com cargas relativamente pequenas ou a plena carga, também, que apresenta apenas duas classes de perdas, sendo elas: uma perda fixa no núcleo e uma perda variável no cobre dos enrolamentos (primário e secundário). E a perda no cobre dos enrolamentos aumenta com o quadrado da corrente de carga (KOSOW, 1982).

Por definição, o transformador convencional isolado apresenta na sua estrutura dois enrolamentos, o que o diferencia do autotransformador que possui apenas um. O autotransformador transfere parte dos seus kVA por condução, a transferência de potência se dá em melhores condições devido a sua característica construtiva, onde o enrolamento do secundário foi substituído pelo mesmo número de espiras adicionados ao primário (CHAPMAN, 2000).

Devido a essa substituição se exige uma menor quantidade de ferro na fabricação do autotransformador, podendo transferir a mesma potência em melhores condições de regulação e rendimento do que um transformador convencional. Outro fator importante é possível ser observado por meio da figura 14, onde a corrente no circuito corresponde à diferença entre as correntes primária e secundária. O efeito disso é que o autotransformador possui um rendimento próximo dos 100%, variando com a relação de transformação (KOSOW, 1982).

Figura 14 - Efeito da Relação de Transformação no Rendimento do Transformador



Fonte: Kosow (1982).

Na figura 14(a) toda a energia é transferida condutivamente e a corrente no transformador é quase zero. Em relação as perdas no cobre do enrolamento, tem o seu valor próximo de zero devido à baixa resistência do enrolamento e a pequena corrente de excitação.

Na figura 14(b) apenas 1/5 do enrolamento total conduz a corrente primária de 10A, enquanto os 4/5 restantes conduzem a corrente de 2,5A. Isso ocorre devido a redução das perdas variáveis no cobre e resulta em um elevado rendimento, entregando a mesma quantidade de kVA.

Na figura 14(c) tem-se que apenas metade da corrente secundária de carga aparece no enrolamento do transformador, isso reduz as perdas variáveis no cobre, quando comparado com um transformador isolado.

3.2.3.1 Volume de cobre

A maneira na qual o autotransformador é fabricado resulta em uma economia de cobre significativa, pois as espiras que são eliminadas no secundário N_2 são substituídas no primário. Essa economia pode ser avaliada da seguinte forma: Quando mantendo a mesma densidade de corrente nos enrolamentos de um transformador, temos que o volume de ferro e cobre no primário e secundário podem ser considerados iguais, ou seja, o volume total é o dobro do volume de cada um deles (NASCIMENTO, 2015).

Deste modo podemos definir que os volumes do cobre para os transformadores e os autotransformadores são respectivamente:

$$V_t = 2N_1 l_m A_1 \text{ e } V_{at} = 2N_s l_m A_s \quad (5)$$

Sendo que:

N corresponde ao número de espiras;

l_m corresponde ao comprimento das espiras médias;

A corresponde a Área;

V_t corresponde ao volume de cobre de um Transformador;

V_{at} corresponde ao volume de cobre de um autotransformador.

É necessário para que opere com a mesma potência, que as correntes no primário dos dois equipamentos sejam iguais, mantendo a mesma densidade de corrente nos seus enrolamentos, assim como as áreas A_1 e A_2 devem ser iguais. Isso resulta na equação 2, onde conclui-se que para transferir energia com a relação de transformação $a = 2$, o autotransformador faz com a metade do cobre exigido para um transformador isolado (KOSOW, 1982).

$$\frac{V_{at}}{V_t} = \frac{N_s}{N_1} = \frac{a - 1}{a} \quad (6)$$

Onde: V_{at} corresponde ao volume de cobre no autotransformador;

V_t corresponde ao volume de cobre de um transformador;

N_s corresponde ao número de espiras do secundário;

N_1 corresponde ao número de espiras do primário.

3.2.3.2 Volume de ferro

A retirada do enrolamento secundário do transformador resulta na redução nos volumes de cobre do autotransformador, como apresentado na equação 2. Analisando as janelas do núcleo, podem-se ter áreas menores e conseqüentemente menores comprimentos médios de seus núcleos, o que indica que há uma redução também na quantidade de ferro necessária para a fabricação do autotransformador (KOSOW, 1982).

3.2.3.3 Perdas no cobre e perdas no ferro

Mantendo a mesma densidade de corrente e com as induções máximas no ferro, as relações de perdas no autotransformador e no transformador serão as mesmas que já existem entre os volumes.

3.2.3.4 Regulação

Segundo Nascimento (2015), o rendimento de um autotransformador se dará melhor do que o rendimento de um transformador, como já foi apresentado, e tende a melhorar quanto mais próximo for a relação de transformação α da unidade, e é dado pela relação feita entre a potência de saída e a potência de entrada, como apresentado pela equação a seguir:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \sum p} \quad (7)$$

Onde: η representa o rendimento do autotransformador;

P_u representa a potência útil fornecida pelo secundário [kW];

$\sum p$ representa o somatório de todas as perdas [kW].

Outro importante fator que deve ser citado é a regulação de tensão que corresponde a variação na tensão de saída. A regulação de tensão é calculada pela equação abaixo:

$$\text{Reg} = \frac{\frac{V_1}{a} - V_2}{V_2} \quad (8)$$

Onde: Reg corresponde ao regulador de tensão;

V_2 corresponde a tensão eficaz secundária, imposta por uma tensão primária aplicada e que faz com que o transformador funcione a plena carga;

$\frac{V_1}{a}$ corresponde a tensão eficaz secundária no transformador a vazio, que foi submetido a mesma tensão aplicada no primário.

A regulação de tensão de um autotransformador é medida com o circuito aberto em plena carga e também será melhor do que a de um transformador, pois enquanto a de um Trafo tem como limite a relação de transformação igual a 1 (um), a de um autotrafo seria 0 (zero).

3.2.4 Vantagens e Desvantagens

De acordo com Nascimento (2015), podem-se destacar vantagens e desvantagens relacionadas ao uso e ao rendimento de um autotransformador comparado a um transformador convencional, observando a forma de instalação e a aplicação desse equipamento.

As vantagens são:

- Peso e tamanho reduzido;
- Baixo custo de produção;
- Maior rendimento;
- Diminuição das perdas;
- Corrente de excitação menor;
- Melhor regulação de tensão.

As desvantagens são:

- Não há existência do isolamento entre o primário e o secundário;
- Não se aplica conexões trifásicas como triângulo-estrela e estrela-triângulo;
- Quando o enrolamento comum é aberto, o secundário pode receber toda a tensão que existe no primário. Se os níveis de tensões forem altos no primário, isso pode acarretar em um acidente grave;
- Impedância reduzida, dessa forma, maiores correntes de faltas;
- Diante de um surto de tensão na linha, as tensões induzidas nos terminais serão maiores no autotransformador do que no transformador convencional;
- Correntes de curto levarão tensões maiores do que a tensão de operação para os enrolamentos.

3.3 Autotransformadores para Interface em Sistemas Fotovoltaicos

3.3.1 ABNT NBR – Diretrizes para Projetos

Para a realização de projetos que envolvam sistemas fotovoltaicos e todas as suas implicações, tais como todos os equipamentos, incluindo o autotransformador, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT estabelece diversas NBR's que indicam essas diretrizes.

Abaixo, as NBR's estabelecidas

- NBR 16149: Esta Norma estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica e estabelece seus requisitos;
- NBR 16150: Esta Norma especifica os procedimentos de ensaio para verificar se os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia estão em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16149;
- NBR IEC 62116: O objetivo desta Norma é fornecer um procedimento de ensaio para avaliar o desempenho das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR);
- NBR 16274: Esta Norma estabelece as informações e a documentação mínimas que devem ser compiladas após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Também descreve a documentação, os ensaios de comissionamento e os critérios de inspeção necessários para avaliar a segurança da instalação e a correta operação do sistema;
- NBR 5356-1: Esta parte da ABNT NBR 5356, em conjunto com as ABNT NBR 5356-2, 3, 4 e 5, aplica-se a transformadores trifásicos e monofásicos (inclusive autotransformadores), excetuando-se certas categorias de pequenos transformadores e transformadores especiais;
- NBR 5440: Esta Norma estabelece os requisitos das características elétricas e mecânicas dos transformadores aplicáveis a redes aéreas de distribuição, nas tensões primárias até 36,2 kV e nas tensões secundárias usuais dos transformadores monofásicos e trifásicos, com enrolamento de cobre ou alumínio, imersos em óleos isolantes com resfriamento natural.

3.3.2 Pesquisa de Mercado (Disponibilidade)

Segundo os sites da *Wise* Transformadores, *MVA* Transformadores e a *Núcleo* ATS Transformadores, os autotransformadores encontrados no mercado podem ser divididos em dois modelos: O ATT, autotransformador trifásico e o ATM, autotransformador monofásico. Um autotransformador do tipo ATT pode ser observado na figura 15.

Ainda de acordo com os sites acima, as características dos autotransformadores podem ser destacadas da seguinte forma:

- Potência de 1kVA até 4000kVA;
- Os enrolamentos podem ser de material alumínio ou cobre;
- Frequência de 50/60 Hz;
- Tensões padronizadas: 220, 380 ou 440V;
- Classe de isolamento: F – 155°C;
- Classe de temperatura de material isolante: F – 105°C;
- Elevação de temperatura do enrolamento: F – 105°C;
- Classe de tensão de isolamento: 0,6kV até 1,2kV;
- Com ou sem caixa de proteção: IP00, IP21, IP23 (Padrão), IP54 e IP64;
- Fator K (uso para locais com harmônicos): Sob consulta;
- De acordo com a solicitação, outras informações técnicas podem ser consideradas para atender necessidades especiais.

Figura 15 - Autotransformador ATT



Fonte: <https://www.wisetransformadores.com.br/autotransformador-trifasicos>.

3.3.3 Dados Fornecidos por Fabricantes

Segundo Azevedo (2011), os transformadores convencionais e os autotransformadores apresentam algumas de suas informações essenciais gravadas na sua placa de identificação, uma chapa metálica colocada junto a carcaça do equipamento. As características apresentadas por essas placas são:

- Nome e demais dados do fabricante;

- Número de série;
- Mês e ano de fabricação do equipamento;
- Potência em kVA;
- Norma regulamentadora utilizada na fabricação;
- Impedância de curto circuito;
- Tipo de óleo isolante;
- Tensões nominais do primário e secundário;
- Diagrama de ligação do primário e secundário com identificação das derivações;
- Indicação do diagrama fasorial quando se tratar de transformadores trifásicos e polaridade quando monofásico;
- Volume total do líquido isolante em litros;
- Massa total em kg;
- Número da placa de identificação.

Além das informações contidas na placa de identificação, o comprador pode exigir também que alguns outros ensaios possam ser apresentados para poder validar o equipamento, tais como:

- Resistência elétrica dos enrolamentos;
- Relação de tensões;
- Resistência do isolamento;
- Polaridade;
- Deslocamento angular (Grupo de Ligação);
- Sequência de fases;
- Perdas (a vazio, em carga e totais);
- Corrente de excitação;
- Tensão de curto-circuito (Impedância);
- Ensaio dielétrico;
- Estanqueidade;
- Rigidez dielétrica do óleo.

3.4 Considerações Finais

O autotransformador tem um único enrolamento em torno de um núcleo ferromagnético, no qual possibilita que a transferência de energia se dê por dois fenômenos notadamente, o acoplamento magnético igual ao que ocorre em um transformador isolado e a ligação elétrica que ocorre através da conexão direta dos dois circuitos, que no transformador convencional não ocorre porque o primário e o secundário são isolados um do outro.

Comparando um transformador isolado a um autotransformador, pode-se citar algumas vantagens ligadas a questões de rendimento que conseqüentemente resultam em economia, tais como, menor quantidade de ferro e cobre na fabricação do autotrafo, o que resulta em menores perdas, considerando os equipamentos nas mesmas condições. Por meio disso, quanto mais próximo for a unidade de transformação melhor também a regulação de um autotransformador.

Como os autotransformadores apresentam altos rendimentos na conversão de energia e por terem preços mais baixos que transformadores convencionais e inversores de sinais CC-CA 220/127 V, a sua aplicação em sistemas fotovoltaicos torna-se uma opção bastante viável.

Por causa da inexistência de isolamento entre seu enrolamento, o autotransformador pode trazer efeitos danosos quando ocorre uma sobretensão vinda por ação atmosférica ou por problemas no sistema elétrico, o que se contrasta com o transformador convencional, que devido a seu isolamento pode proteger a rede dependendo da anomalia que ocorrer.

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS.

4.1 Considerações Iniciais.

Neste capítulo começa a descrição dos experimentos realizados que compõem esse trabalho. Os procedimentos realizados foram o ensaio a vazio e o ensaio de curto-circuito, para determinar o rendimento de um autotransformador de 30 kVA, observando diferentes níveis de corrente ao longo do experimento.

O ensaio a vazio resulta na determinação de alguns parâmetros do autotransformador, como:

- Perdas no núcleo ($P_{\text{histerese}} + P_{\text{foucault}}$);
- Corrente à vazio (I_0);
- Relação de transformação (α);
- Impedância do ramo magnetizante (Z_m).

No caso do ensaio em curto circuito, o objetivo é a determinação das:

- Perdas no cobre (P_j);
- Queda de tensão interna (ΔV);
- Impedância, resistência e reatância de dispersão (Z_{e1} , R_{e1} e X_{e1}).

4.2 Características dos Modelo Ensaiado.

O autotransformador utilizado nos ensaios, juntamente com seu modelo e suas características, encontra-se em sua placa de identificação ao qual se observa suas especificações técnicas contidas na figura 16.

Figura 16 - Placa de Identificação do Autotransformador

POLIENGE ENERTRONIC INDUSTRIAL LTDA CNPJ: 07.275.552/0001-51
 Estrada Geraldo Miranda, 250- Ralfo. I.E. 672.206.125.110
 Suzano-SP - CEP: 08653-055.
 Tel: 55 (11) 4743-7406 www.polienge.com.br

Tipo Type **TRANSFORMADOR** Proj. Ref. **TITA-F-0288V2**

N° Serie Serial number **72554** Mês/Ano Moth/Year **09/17** Grau de prot. Protction degree **21**

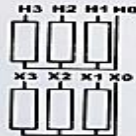
Metodo de resfr. Cooling method **AN** Fator k k factor **1** Classe isol. Insulation class. **1,1** kV Classe temp. Insulation temp. class **F**

Fases Phases **3** Frequência Frequency **60** Hz Elevação temp. Temp. rise **100** Impedância à 120°C Impedance **4,5** %

Potência Power **30** kVA Grupo ligação Linking group **YNyn0** Desloc. angular Angular displacem. **0°** Massa Weight **142** Kg

Normas aplicadas Aplicable standards **NBR:5356-1; 2; 3; 4; 5; 11.**

Primário/Input			Secundário/Output		
ID	V	A	ID	V	A
H1-H2-H3	380	46	X1-X2-X3	220	79



Fonte: Autor

4.3 Análise de Segurança.

Os ensaios realizados foram feitos em laboratórios observando todos os procedimentos de segurança exigidos pelo local. Foram observadas as vestimentas das pessoas presentes, as conexões existentes nas bancadas, as proteções existentes nos quadros de distribuições e as formas corretas de instalações dos equipamentos.

Após a verificação da teoria e da montagem dos equipamentos sem alimentação, foram feitas as verificações de segurança para evitar a ocorrência de acidentes no momento das atividades práticas. Foram observadas que, na estrutura do laboratório, o piso é revestido de borracha para melhor isolamento do local, além disso, todos os participantes do processo experimental utilizavam sapatos fechados e calças cumpridas de algodão. Na proteção da instalação elétrica existiam 3 disjuntores que faziam parte da estrutura construída no recinto e mais dois disjuntores no circuito da bancada utilizada. O variador de tensão utilizado no experimento pode ser colocado também como um dispositivo de proteção, pois evita que a tensão nominal da rede seja injetada diretamente ao equipamento.

4.4 Materiais.

Os materiais e equipamentos utilizados nos experimentos estão descritos abaixo:

- Autotransformador trifásico polienge Y-Y 380/220 V;
- Variador de tensão trifásico JNG – TSGC2-9 de 9 kVA;

- Analisador de energia FLUKE 1738 *POWER LOGGER*;
- Multímetro digital *Icel* Manaus MD-6111;
- Fonte de alimentação contínua GW GPC-3020D 5V;
- Jogos de ferramentas chaves *phillips* e de fenda;
- Trena de medição de 2 metros;
- Cabos de conexões.

4.5 Ensaio a Vazio.

4.5.1 Procedimentos do Ensaio.

O procedimento para o teste de ensaio a vazio foi realizado em um laboratório que contava com uma bancada que fornecia tensões trifásicas e monofásicas de acordo com seu uso e ajuste.

O primeiro passo, foi realizar as conexões da bancada de alimentação – desligada – ao variador de tensão trifásico (varivolt) JNG – TSGC2-9. As fases R, S, T e o neutro N foram conectadas ao a, b, c e 0, respectivamente do *input* do varivolt, como visto na figura 17.

Figura 17 - Ligação entre a Bancada e o Variador de Tensão



Fonte: Autor

Em seguida, a, b, c e 0 do *output* do variavolt foram conectados no X_1 , X_2 , X_3 e no neutro NX_0 , respectivamente, do autotransformador poliengte 380/220 V.

Depois, utilizando-se do analisador de energia FLUKE 1738, conectou-se os fios A, B, C e N ao X_1 , X_2 , X_3 e NX_0 , respectivamente, do autotransformador, para assim, poder realizar as medições de tensões do sistema. Conectou-se também, os fios L1/A, L2/B, L3/C e L0/N do analisador de energia ao meio dos cabos de conexões que faziam a ligação entre o variador de tensão e o autotransformador, para que dessa forma fosse possível as medições de correntes do sistema. A figura 18 mostra como ficou a montagem do analisador de energia.

Figura 18 - Ligação entre o Analisador e o Autotransformador

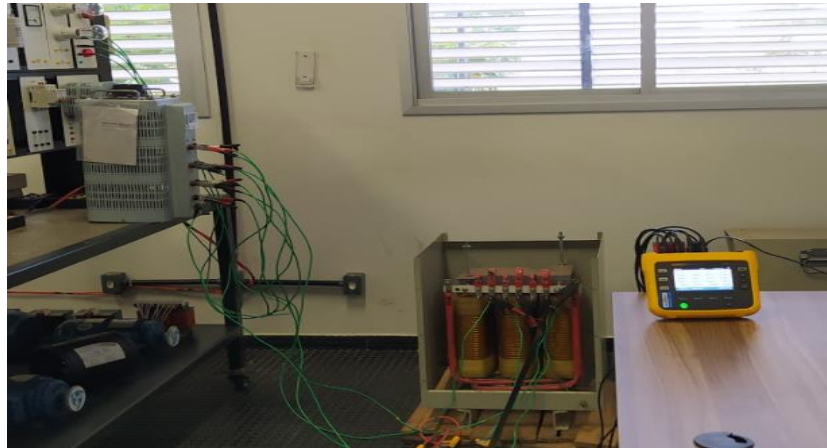


Fonte: Autor

Após realizado todo o esquema de ligação descrito acima, a alimentação da bancada foi liberada e conseqüentemente a alimentação de todo o sistema.

Utilizando-se de um multímetro digital *Icel* Manaus MD-6111, foi realizada a medição da tensão no *output* do variavolt, ajustando seu valor de saída para 220 V entre suas fases e 127 V entre sua fase e neutro. O sistema final ficou de acordo como mostrado na figura 19.

Figura 19 - Sistema Final do Ensaio a Vazio



Fonte: Autor

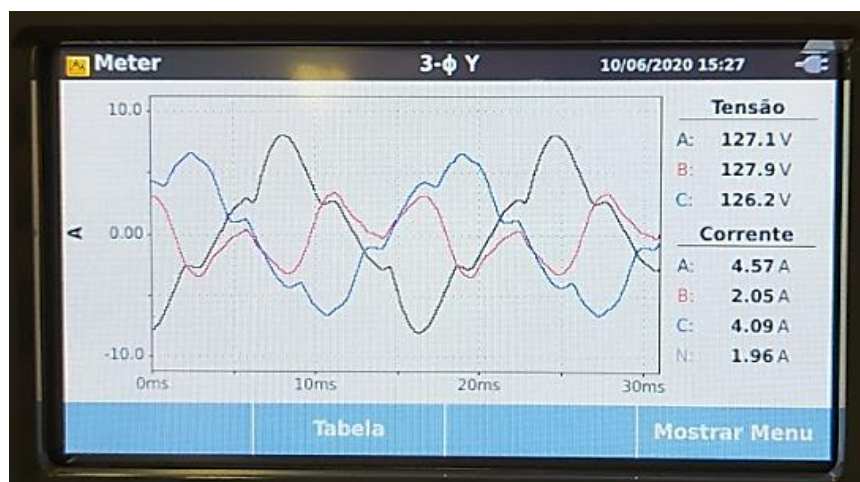
No ensaio a vazio, por questões práticas e de segurança, o experimento foi realizado no lado de baixa tensão (BT), pois a corrente que é gerada nesse lado é baixa em relação ao lado de alta tensão (AT), o que traz maior conforto para os executantes da atividade. Sendo assim, no BT do autotransformador foram feitas as conexões com o varivolt e o analisador de energia, e o AT do autotransformador ficou em aberto durante a execução do experimento.

4.5.2 Dados medidos.

Com o uso do analisador de energia, foi possível medir todas as variáveis do ensaio a vazio realizado: tensões, correntes, potências e fatores de potências.

Por meio da figura 20 é possível observar todos os valores medidos para esse ensaio.

Figura 20 - Valores de Tensões e Correntes do Ensaio a Vazio



Fonte: Autor

Na figura 21 pode-se observar os valores de potência e de fator de potência do ensaio a vazio.

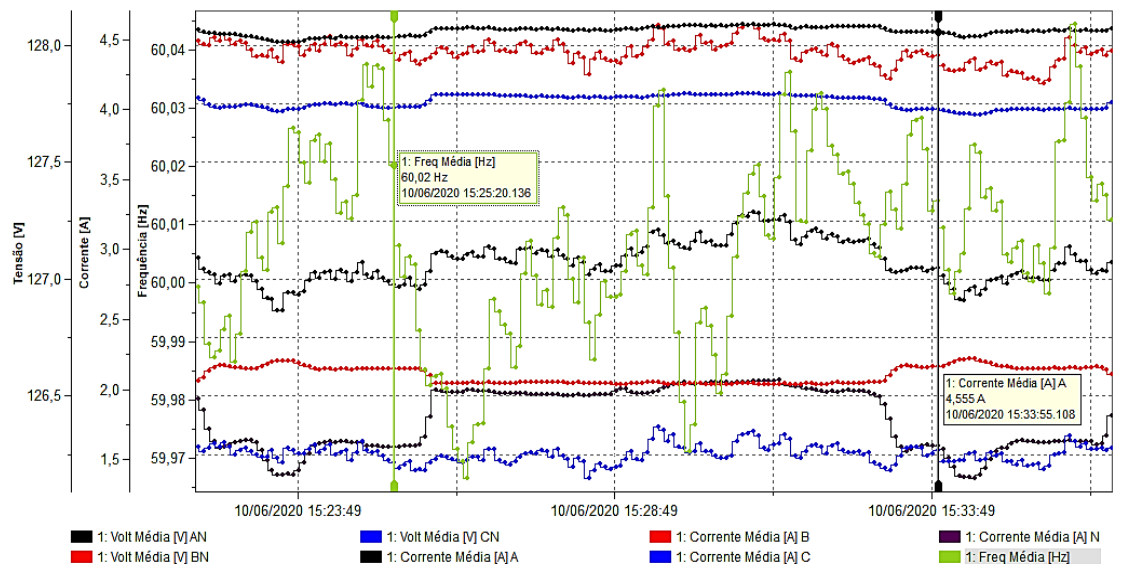
Figura 21 - Valores de Potência e Fator de Potência do Ensaio a Vazio



Fonte: Autor

No gráfico 3 é possível observar as formas de ondas da tensão, corrente e frequência do ensaio a vazio.

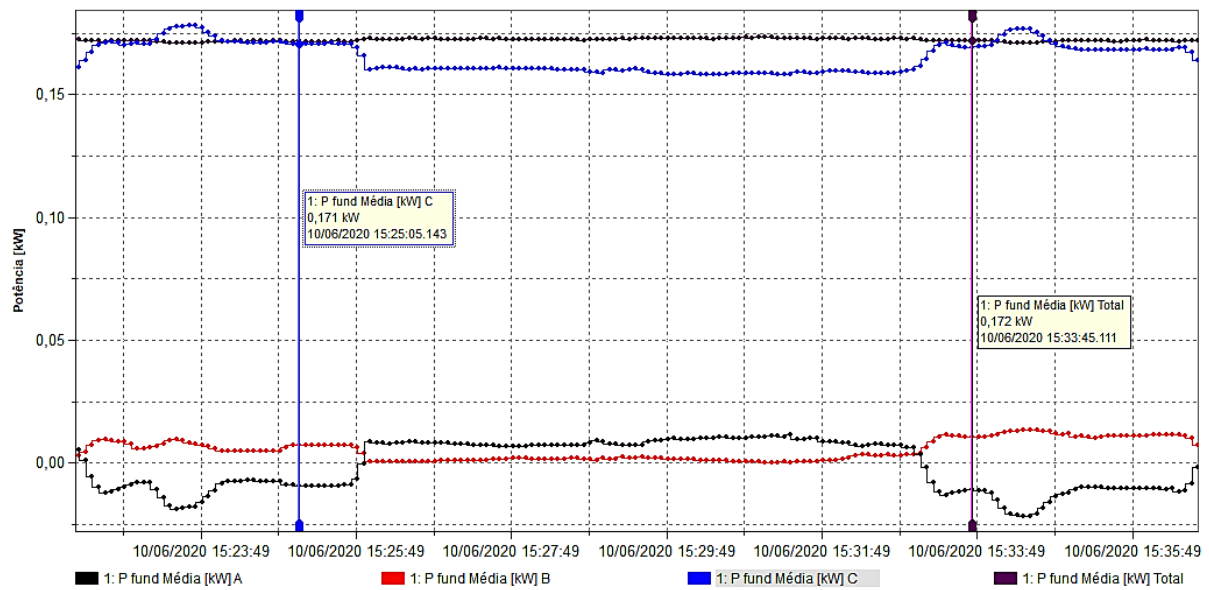
Gráfico 3 - Tensão, Corrente e Frequência do Ensaio a Vazio.



Fonte: Autor

No gráfico 4 pode-se observar as formas de ondas das potências do ensaio a vazio.

Gráfico 4 - Potência Ativa do Ensaio a Vazio



Fonte: Autor

Com os dados obtidos no ensaio a vazio, utilizando o analisador de energia, pode-se determinar o valor da corrente a vazio I_0 , conforme equação (9)

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (9)$$

Onde: I_0 é corrente a vazio;

I_A é a corrente da fase A;

I_B é a corrente da fase B;

I_C é a corrente da fase C.

$$I_0 = \frac{4,57 + 2,05 + 4,09}{3}$$

$$I_0 = 3,57 \text{ A}$$

O cálculo de fator de potência a vazio (FP_0) pode ser obtido utilizando a equação (10).

$$FP_0 = \frac{P_0}{V_N I_0} \quad (10)$$

Onde: FP_0 é o fator de potência a vazio;

P_0 é a potência a vazio;

V_n é a tensão nominal;

I_0 é a corrente a vazio.

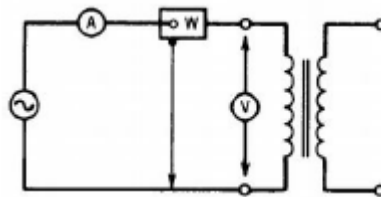
$$FP_0 = \frac{160 \text{ W}/3}{127 \text{ V} \cdot 3,57 \text{ A}}$$

$$FP_0 = 0,11$$

4.5.3 Parâmetro de Núcleo.

No ensaio a vazio o lado secundário do transformador fica em circuito aberto, enquanto o primário é alimentado com tensão e frequências nominais. Os valores da tensão aplicada (V_1), assim como os dados obtidos pela medição, de corrente (I_0) e potência absorvida (P_0) são importantes para a análise do ensaio, pois serão utilizadas para calcular os parâmetros. O esquema de montagem para o ensaio a vazio é apresentado na figura 22.

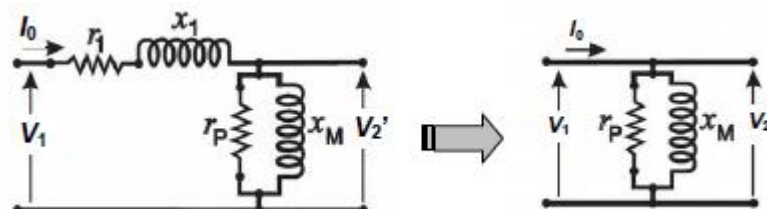
Figura 22 - Esquema para realizar o ensaio a vazio



Fonte: Kosow (1982)

Como na realização do ensaio a vazio o secundário do transformador está em aberto, pode-se simplificar o circuito, desprezando a queda de tensão na resistência do primário r_1 e a reatância de dispersão x_1 e a corrente em vazio I_0 que são valores pequenos (KOSOW, 1982), como mostra a figura 23.

Figura 23 - Circuito equivalente para o transformador a vazio



Fonte: Kosow (1982)

Por meio do que foi apresentado, tem-se que os parâmetros r_p e x_m podem ser calculados utilizando-se as fórmulas apresentadas nas equações de 11 a 13.

$$\cos\phi_0 = \frac{P_0}{V_1 I_0} \quad (11)$$

Onde: $\cos\phi_0$ corresponde ao fator de potência;

P_0 corresponde a potência a vazio;

V_1 corresponde a tensão no primário;

I_0 corresponde a corrente a vazio.

$$\cos\phi_0 = \frac{160W}{\sqrt{3}220V \times 3,57A}$$

$$\cos\phi_0 = 0,1176$$

$$r_p = \frac{V_1}{I_0 \cos\phi_0} \quad (12)$$

Onde: r_p é o parâmetro de resistência.

$$r_p = \frac{127}{3,57A \times 0,1176}$$

$$r_p = 302,5\Omega$$

$$x_m = \frac{V_1}{I_0 \sin\phi_0} \quad (13)$$

Onde: x_m é o parâmetro da indutância;

$\sin\phi_0$ é o fator de potência.

$$\phi_0 = \arcsin(0,1176)$$

$$\phi_0 = 83,24^\circ$$

$$x_m = \frac{127}{3,57A \times \sin(83,24^\circ)}$$

$$x_m = 35,82\Omega$$

É importante destacar que a perda Joule no enrolamento desse ensaio é desprezível, pois a potência medida, identificada como P_0 , corresponde com aproximação, às perdas no núcleo do transformador.

4.6 Ensaio de Resistência Elétrica dos Enrolamentos e Perdas de Curto-Circuito.

4.6.1 Procedimentos do Ensaio.

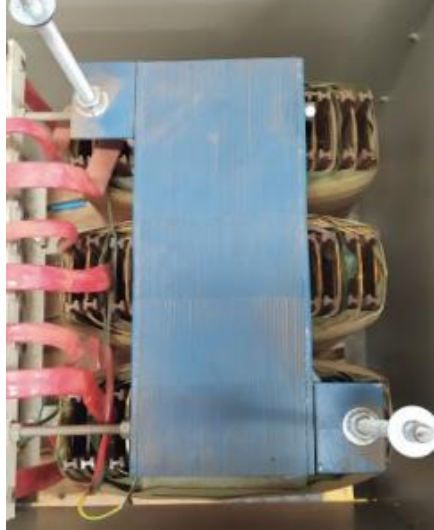
O ensaio em curto circuito, essencial para análise de rendimento do autotransformador, não foi possível ser feito da forma tradicional, como aconteceu no ensaio a vazio, usando o analisador de energia para medir tensão, corrente, potência e fator de potência. Percebeu-se, após uma análise de como seria feito esse experimento, que a corrente que seria gerada nesse sistema alcançaria um valor muito alto e não havia um equipamento acessível que pudesse realizar o controle dessa corrente, como um variador de tensão utilizado no ensaio a vazio por exemplo, fazendo com que o autotransformador fosse energizado com a sua corrente nominal. Foi realizado uma tentativa de ensaiar o autotransformador em curto circuito, direto na rede, sem um controlador de corrente e a proteção do laboratório atuou, não permitindo assim, a realização do ensaio. Por isso fizemos a substituição do ensaio de curto-circuito pelo ensaio de determinação da resistência elétrica dos enrolamentos.

Com toda a problemática apresentada, validou-se os valores colhidos no ensaio de resistência elétrica por meio dos cálculos de resistência a partir das medidas geométricas do núcleo (seção das pernas laterais e central) e contagem no número de espiras nos enrolamentos, o que permitiu estimar o comprimento total de cada bobina. Dessa forma foi possível determinar com segurança, as perdas nos enrolamentos, que são as perdas encontradas no ensaio em curto-circuito (P_{CC}), possibilitando assim, completar o estudo de rendimento do autotransformador.

Nesse experimento, diferente do ensaio a vazio, o ensaio de resistência elétrica foi realizado no lado de alta tensão.

Primeiramente, utilizando uma trena, foram feitas as medições dos lados do carretel (base e altura) do autotransformador poliengue 380/220 V, a distância do carretel até a primeira camada de uma bobina e a espessura do fio que constituía a bobina, conforme mostra a figura 24.

Figura 24 - Vista Superior do Autotransformador



Fonte: Autor

Após, realizou-se a contagem do número de espiras de cada bobina. Lembrando que o autotransformador é constituído de três bobinas e cada uma delas possui 30 espiras com 4 camadas de enrolamento, como mostra a figura 25.

Figura 25 - Vista Frontal do Autotransformador



Fonte: Autor

Todo esse procedimento foi realizado visando descobrir qual era o valor de resistência total em cada bobina. Com os valores medidos, foi possível fazer os cálculos que levaria a essa resistência.

Depois de feito os passos descritos acima e com o valor da resistência calculado, foi realizado o ensaio de resistência elétrica. Este ensaio pode ser reproduzido injetando-se corrente contínua nos terminais do autotransformador para determinar a resistência elétrica em cada bobina e comparar com o valor de resistência calculado.

Fonte: Autor.

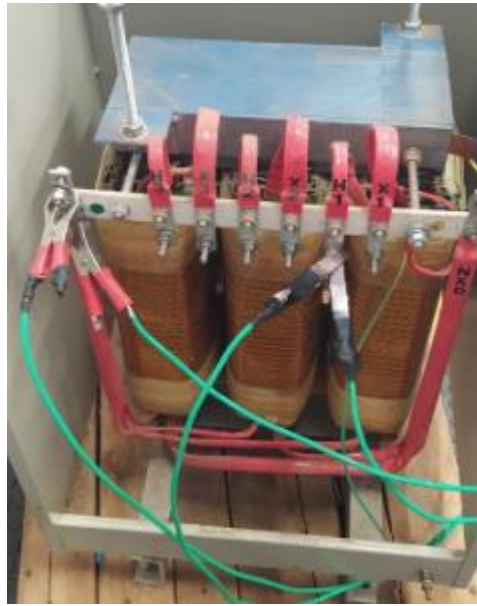
Figura 26 - Fonte de Alimentação GW GPC-3020D ajustada em 1 A



Basicamente, o ensaio de resistência elétrica acontece da seguinte forma, aplicasse um valor de corrente nos terminais das bobinas, mede-se a queda de tensão em cima dessas bobinas e a partir da lei de Ohm é possível a determinar o valor de resistência de cada bobina contida no autotransformador.

Primeiramente, regulou-se a fonte de alimentação GW GPC-3020D de corrente contínua em 1 A, como mostra a figura 26.

Depois, conectou-se os terminais positivo e negativo da fonte aos terminais H_1-NH_0 do autotransformador, respectivamente, como mostra a figura 27. Esse processo foi repetido para H_2-NH_0 e H_3-NH_0 . Depois, da mesma forma e simultaneamente, conectou-se o multímetro digital *Icel* Manaus MD-6111 aos terminais H_1-NH_0 do autotransformador. Esse processo foi repetido para H_2-NH_0 e H_3-NH_0 .

Figura 27 - Ensaio de Resistência Elétrica H₁-NH₀

Fonte: Autor

Os terminais H₁, H₂, H₃ e NH₀ estão relacionados com o lado de alta tensão do autotransformador utilizado, por isso o ensaio de resistência elétrica revelará a resistência total R₁. Para se medir o valor de resistência total R₂, no lado de baixa tensão do autotransformador, foi preciso realizar o ensaio de resistência elétrica também nos terminais X₁, X₂, X₃ e NX₀.

A figura 28 mostra o esquema de ligação do ensaio de resistência elétrica no autotransformador.

Figura 28 - Esquema de Ligação do Ensaio de Resistência Elétrica



Fonte: Autor

Depois de todas as conexões montadas e verificadas, alimentou-se uma bobina por vez, no lado de alta tensão e depois no lado de baixa tensão, do autotransformador com a corrente contínua da fonte de tensão e realizou-se todas as medições necessárias do experimento.

4.6.2 Dados Medidos.

No primeiro momento, ao medir os lados do carretel (base x altura) e depois, medindo-se a distância do carretel até a primeira camada de uma das bobinas ($d = 2,6 \text{ cm}$), foi possível calcular o comprimento total (L_{Total}) de cada camada das 3 bobinas do autotransformador. Lembrando que, o autotransformador possui 3 bobinas, 4 camadas de enrolamento em cada bobina, 30 espiras em cada uma das bobinas e a distância do carretel até a primeira camada é igual a distância entre as camadas de cada bobina.

No quadro 1, podem-se ver os resultados de medidas de base e altura de cada bobina.

Quadro 1 - Medidas de Base e Altura de cada Camada

	Base (b)	Altura (h)
Carretel	12 cm	7 cm
Camada L ₁	14,6 cm	9,6 cm
Camada L ₂	17,2 cm	12,2 cm
Camada L ₃	19,8 cm	14,8 cm
Camada L ₄	22,4 cm	17,4 cm

Fonte: Autor

Para obter o valor do comprimento total de enrolamento em cada camada foi necessário calcular o perímetro de cada camada utilizando a equação 14.

$$P = 2(b + h) \quad (14)$$

Onde: P corresponde ao perímetro;

b corresponde a base;

h corresponde a altura.

Em seguida, multiplicar os valores de perímetro de cada camada pelo número de espiras contidas em cada camada, no caso em questão, 30 espiras. O resultado pode ser visto no quadro 2.

Quadro 2 - Comprimento Total em cada Camada

	$P = 2(b + h)$	Espiras	Total
Camada L ₁	48,4 cm	30	1452 cm
Camada L ₂	58,8 cm	30	1764 cm
Camada L ₃	69,2 cm	30	2076 cm
Camada L ₄	79,6 cm	30	2388 cm
L _{Total}	-	-	7680 cm

Fonte: Autor

De acordo com o quadro 2, o valor total de enrolamento em cada bobina (L_{Total}) é de 76,80 metros de comprimento.

A secção nominal do fio utilizado que constitui a bobina tem um valor aproximado de 16,77 mm². Utilizando a tabela de conversão AWG/MCM para mm da *American Wire Gauge* foi possível obter o tipo de fio e o valor de resistência desse fio, como pode ser visto no quadro 3.

Quadro 3 - Resistência do Fio

Tipo	Secção	Resistência
5 AWG	17 mm ²	0,0010 Ω/m

Fonte: Autor.

Com o valor de resistência do fio (R_{Fio}) e o valor total do comprimento de uma bobina (L_{Total}), foi possível realizar o cálculo de resistência total de cada bobina do primário (R₁) através da fórmula:

$$R_1 = L_{Total} \cdot R_{Fio} \quad (15)$$

Onde: R₁ corresponde a resistência do primário do autotransformador;

L_{Total} corresponde ao comprimento total em cada uma das bobinas;

R_{fio} corresponde a resistência do fio.

O resultado obtido pode ser visto no quadro 4.

Quadro 4 - Resistência Total em cada Bobina do Primário

L _{Total}	R _{Fio}	R ₁ = L _{Total} R _{Fio}
76,80 m	0,0010 Ω/m	0,0768 Ω

Fonte: Autor.

O autotransformador trifásico utilizado tem uma potência aparente de 30 KVA, o que faz com que em cada fase haja uma potência aparente de 10 KVA. Então, para o cálculo de corrente de curto circuito (I_{CC}) é utilizado a equação (16).

$$I_{CC} = \frac{S\phi}{V_n} \quad (16)$$

Onde: I_{CC} corresponde a corrente de curto circuito;

$S\phi$ corresponde a potência monofásica do autotransformador;

V_n corresponde a tensão nominal no autotransformador.

$$I_{CC} = \frac{10KVA}{220 V}$$

$$I_{CC} = 45,45 A$$

Com o valor de corrente de curto circuito (I_{CC}) encontrado e o valor de resistência de cada bobina (R_1), é possível conseguir calcular a potência de curto circuito (P_{CC}), conforme mostra a equação (17).

$$P_{CC} = R_1 \cdot I^2 \quad (17)$$

Onde: P_{CC} corresponde à potência de curto circuito;

R_1 corresponde a resistência do primário;

I corresponde a corrente nominal do autotransformador.

$$P_{CC} = 0,0768 \Omega \cdot (45,45 A)^2$$

$$P_{CC} = 158,65 W$$

De acordo com os dados do fabricante encontrados na placa do autotransformador, o valor de impedância por fase ($Z\%$) é de 4,5%. Dessa forma, pode-se determinar o valor de tensão de curto circuito (V_{CC}), conforme a equação (18).

$$Z\% = \frac{V_{CC}}{V_n} \quad (18)$$

Onde: Z corresponde a impedância de entrada;

V_{CC} corresponde a tensão de curto;

V_n corresponde a tensão de curto circuito.

$$4,5\% = \frac{V_{CC}}{220V}$$

$$V_{CC} = 9,9V$$

Para realizar o cálculo do fator de potência (FP_{CC}) em curto circuito utiliza-se a equação (19).

$$FP_{CC} = \frac{P_{CC}}{V_{CC}I_N} \quad (19)$$

Onde: FP_{CC} corresponde ao fator de potência em curto circuito;

P_{CC} corresponde a potência em curto circuito;

V_{CC} corresponde a tensão de curto;

I_N corresponde a corrente nominal.

$$FP_{CC} = \frac{158,65W}{9,9V \times 45,45A}$$

$$FP_{CC} = 0,3525$$

Por fim, para definir o valor de R_2 , que é a resistência total de cada bobina do secundário, utilizou-se a equação (20) para o cálculo de relação de transformação.

$$\alpha_F = \frac{V_{Primário}}{V_{Secundário}} \quad (20)$$

Onde: α_F corresponde a relação de transformação entre fases;

$V_{Primário}$ corresponde a tensão no primário;

$V_{\text{Secundário}}$ corresponde a tensão no secundário.

$$\alpha_F = \frac{220}{127}$$

$$\alpha_F = 1,73$$

Logo,

$$\alpha_F^2 = \frac{R_1}{R_2} \quad (21)$$

$$(1,73)_F^2 = \frac{0,0768 \Omega}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{0,0768 \Omega}{2,99}$$

$$R_2 = 0,025 \Omega$$

Depois de todos os cálculos realizados para as definições de alguns parâmetros do ensaio em curto circuito e, principalmente, os valores de R_1 e R_2 encontrados, temos agora os resultados advindos do ensaio de resistência elétrica nos terminais primários e secundários do autotransformador.

Com o teste de corrente contínua realizado no primário do autotransformador, ou seja, nos terminais H_1 , H_2 , H_3 e NH_0 , obteve-se os resultados como pode ser observado no quadro 5.

Quadro 5 - Ensaio de Resistência Elétrica no Primário

$H_1 - NH_0$	$H_2 - NH_0$	$H_3 - NH_0$
0,076 Ω	0,080 Ω	0,082 Ω

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos nos terminais do secundário, X_1 , X_2 , X_3 e NX_0 podem ser observados no quadro 6.

Quadro 6 - Ensaio de Resistência Elétrica no Secundário

$X_1 - NX_0$	$X_2 - NX_0$	$X_3 - NX_0$
0,019 Ω	0,021 Ω	0,021 Ω

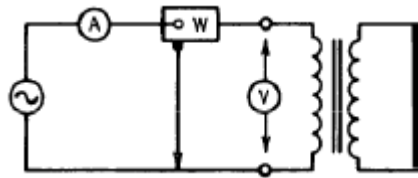
Fonte: Autor

A partir dos quadros 5 e 6, pode-se observar que os valores calculados ficaram bem próximos dos obtidos através do ensaio de resistência elétrica.

4.6.3 Parâmetros dos Enrolamentos.

No ensaio em curto-circuito um dos lados do transformador é curto-circuitado, de preferência, o lado de baixa tensão, enquanto no outro lado é aplicado uma tensão V_{CC} crescente, com frequência nominal, até que a corrente atinja o seu valor nominal. O Esquema de montagem para o ensaio em curto-circuito é apresentado na figura (29).

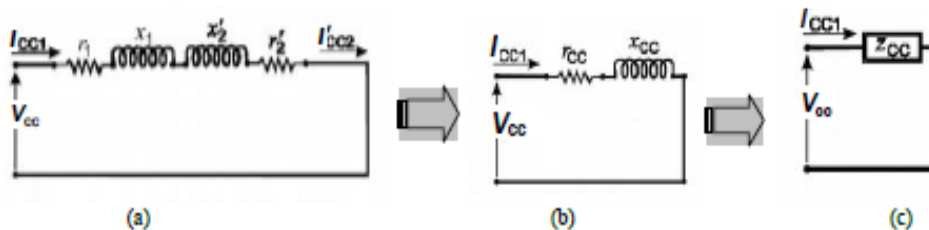
Figura 29 - Esquema de montagem para o ensaio em curto-circuito



Fonte: (KOSOW, 1982)

Estando o transformador em curto-circuito, a tensão V_{CC} para manter a corrente de curto-circuito igual a corrente nominal é muito menor do que a tensão nominal V_{NOM} , (em torno de 3 a 10% desse valor). Com essas condições o circuito equivalente pode ser reduzido. O ramo paralelo é eliminado, porque a corrente I_0 e as perdas no núcleo dependem da tensão aplicada e podem ser desprezadas. A potência absorvida P_{CC} , medida pelo wattímetro corresponde às perdas por efeito Joule nos enrolamentos (KOSOW, 1982), conforme mostra a figura (30).

Figura 30 - Circuito equivalente para o transformador em curto-circuito



Fonte: Kosow (1982)

Através do que foi apresentado é possível calcular os parâmetros por meio das equações (22) a (24).

$$Z_{CC} = Z_{eq} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (22)$$

$$r_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (23)$$

$$r_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (23)$$

$$x_{CC} = \sqrt{Z_{CC}^2 - r_{CC}^2} \quad (24)$$

Onde: Z_{CC} impedância em curto circuito;

V_{CC} corresponde a tensão de curto;

I_{CC} corresponde a corrente de curto circuito;

P_{CC} corresponde a potência em curto circuito;

r_{CC} corresponde a resistência em curto circuito;

x_{CC} corresponde a reatância em curto circuito.

Adota-se algumas hipóteses para que sejam determinados os valores de r_1 , r_2 , x_1 e x_2 , conforme equações (25) a (28).

$$r_1 = \frac{r_{CC}}{2} \quad (25)$$

$$r_2 = \frac{r_{CC}}{2a^2} \quad (26)$$

$$x_1 = \frac{x_{CC}}{2} \quad (27)$$

$$x_2 = \frac{x_{CC}}{2a^2} \quad (28)$$

Onde: r_1 corresponde à resistência do primário;

r_2 corresponde à resistência do secundário;

x_1 corresponde à reatância do primário;

x_2 corresponde à reatância do secundário;

Diferente dos parâmetros referentes ao núcleo, que sofrem efeitos da saturação magnética, os parâmetros dos enrolamentos permanecem constantes.

Os dados colhidos no ensaio de resistência elétrica fundamentam todo o cálculo de parâmetros equivalentes do lado de alta que podem ser vistos nas equações (29) a (31).

$$R_{CC} = R_{e1} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (29)$$

$$R_{CC} = R_{e1} = \frac{158,65W}{45,45^2 A}$$

$$R_{CC} = R_{e1} = 0,0768 \Omega$$

$$Z_{CC} = Z_{e1} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (30)$$

$$Z_{CC} = Z_{e1} = \frac{9,9V}{45,45A}$$

$$Z_{CC} = Z_{e1} = 0,2178 \Omega$$

$$X_{CC} = X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} \quad (31)$$

$$X_{CC} = X_{e1} = \sqrt{(0,2178)^2 - (0,0768)^2}$$

$$X_{CC} = X_{e1} = 0,2038 \Omega$$

Onde: R_{e1} corresponde à resistência equivalente do primário;

X_{e1} corresponde à reatância equivalente do primário;

Z_{e1} corresponde à impedância equivalente do primário.

4.7 Análise Comparativa do Rendimento.

Com os dados coletados dos dois ensaios realizados no autotransformador, pode-se então realizar a análise do rendimento do mesmo em ambos os experimentos, através dos quadros 7 e 8.

Quadro 7 - Dados coletados do Ensaio a Vazio

V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	I_N	P_0	FP_0
127,1 V	127,9 V	126,2 V	4,57 A	2,05 A	4,09 A	1,96 A	0,16 KW	0,11

Fonte: Autor

Quadro 8 - Dados obtidos por meio do Ensaio de Resistência.

V_{CC}	I_{CC}	R_1	R_2	P_{CC}
9,9 V	45,45 V	0,0768 Ω	0,025 Ω	158,65 W

Fonte: Autor.

Para obter o valor do rendimento do autotransformador, usou-se o cálculo descrito na equação (32).

$$\eta\% = \frac{P_{Saída}}{P_{Saída} + P_{Perdas}} = \frac{V_2 I_2 \cos\theta_2}{V_2 I_2 \cos\theta_2 + [Perdas \text{ no Núcleo} + I_2^2 R_{e2}]} \quad (32)$$

Onde: $P_{Saída}$ corresponde às perdas relacionadas com o secundário do autotransformador;

P_{Perdas} corresponde às perdas relacionadas com o núcleo e o enrolamento do autotransformador.

Para se obter uma melhor análise do rendimento do autotransformador, foi realizado o cálculo utilizando-se um fator de potência (F_p) unitário e depois um fator de potência de 0,92.

O cálculo de rendimento foi realizado utilizando-se de partes fracionadas da corrente, de 10 em 10%, até o valor total de $I_2 = 45,45 A$. Lembrando que as perdas no cobre variam com o quadrado da fração de carga, por isso, todas as porcentagens serão elevadas a 2 (dois) na realização do cálculo.

Levando em conta que se trata de autotransformador trifásico, o $P_{CC} = I_2^2 R_{e2}$, será multiplicado por 3 para o cálculo final.

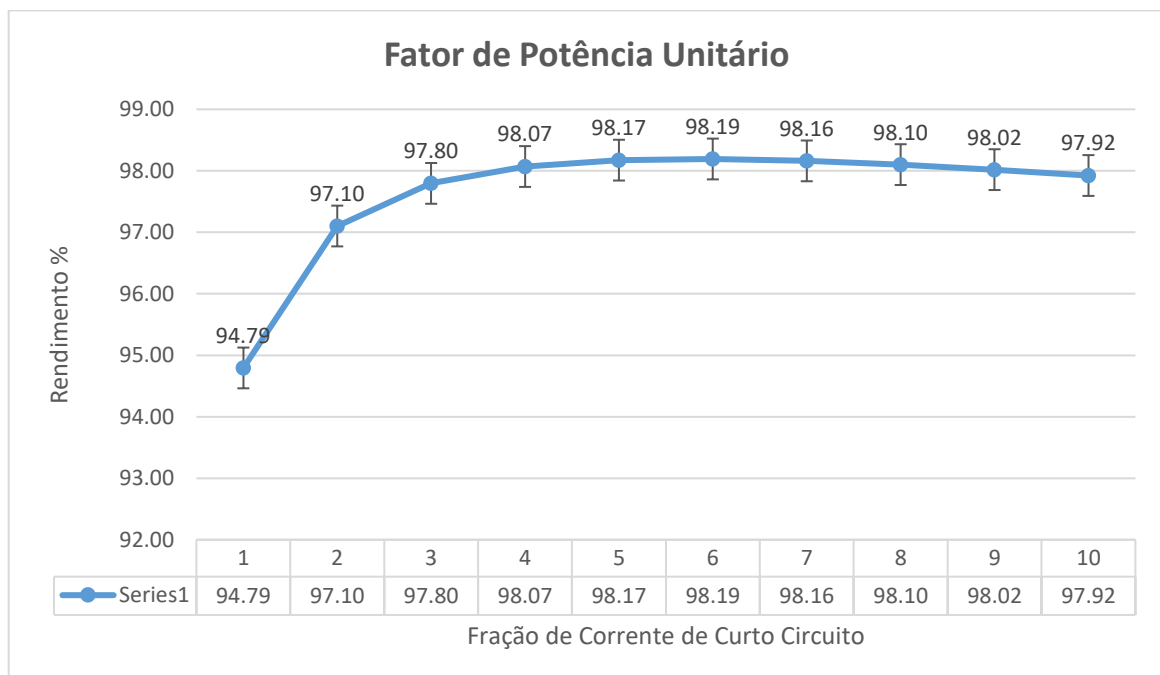
O quadro 9 mostra os resultados dos cálculos de rendimento do autotransformador entregando energia à uma carga de fator de potência (F_p) unitário e o gráfico 5 mostra a curva característica do rendimento para esse fator de potência.

Quadro 9 - Rendimento do Autotransformador para o F_p Unitário da carga

Porcentagem (%)	Corrente I_{CC} (A)	Rendimento (η %)
10	4,545	94,79
20	9,09	97,10
30	13,635	97,80
40	18,18	98,07
50	22,725	98,17
60	27,27	98,19
70	31,815	98,16
80	36,36	98,10
90	40,905	98,02
100	45,45	97,92

Fonte: Autor.

Gráfico 5 - Rendimento do Autotransformador para o F_p Unitário da carga



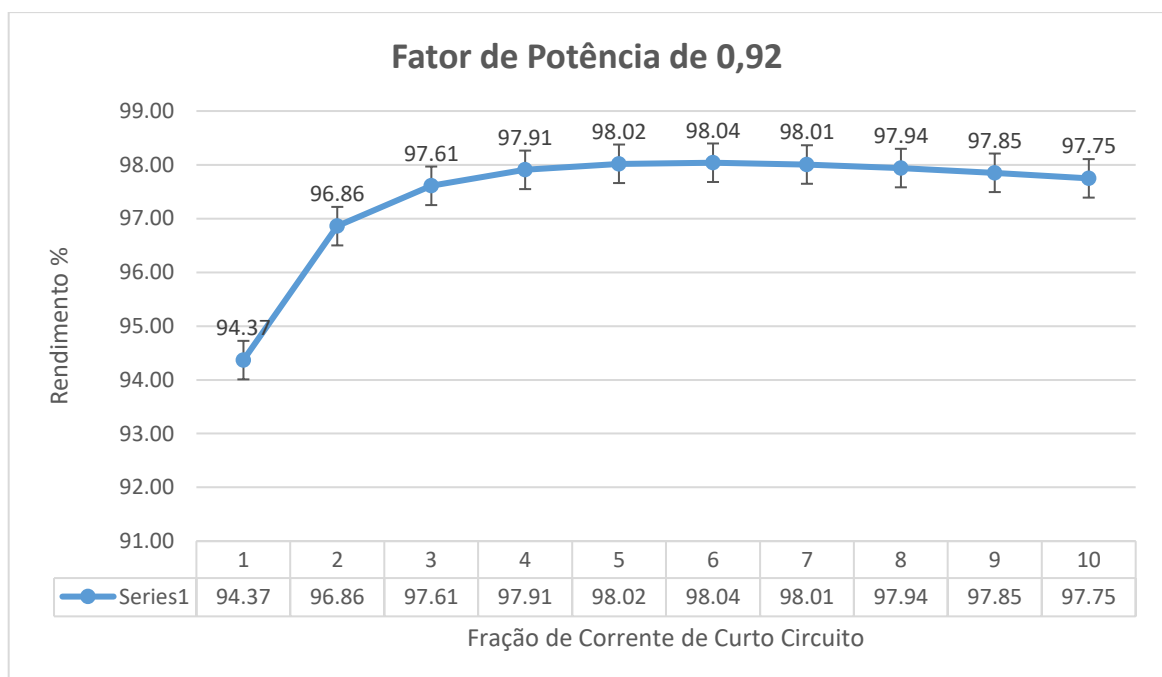
Fonte: Autor

O quadro 10 mostra os resultados dos cálculos de rendimento do autotransformador entregando energia à uma carga para um fator de potência (F_p) de 0,92 e o gráfico 6 mostra a curva característica do rendimento para esse fator de potência.

Quadro 10 - Rendimento do Autotransformador para o F_p de 0,92 da carga

Porcentagem (%)	Corrente I_{CC} (A)	Rendimento ($\eta\%$)
10	4,545	94,37
20	9,09	96,86
30	13,635	97,61
40	18,18	97,91
50	22,725	98,02
60	27,27	98,04
70	31,815	98,01
80	36,36	97,94
90	40,905	97,85
100	45,45	97,75

Fonte: Autor

Gráfico 6 - Rendimento do Autotransformador para o F_p de 0,92 carga

Fonte: Autor.

É possível notar através da equação (32), que o fator de potência de carga determina a potência útil secundária. Ou seja, para um mesmo valor de corrente nominal de carga, se houver uma redução no fator de potência, há uma redução no rendimento. Também por meio dessa equação têm-se a curva de rendimento de um autotransformador.

Sob cargas relativamente leves, as perdas fixas são elevadas e o rendimento é baixo. Para cargas pesadas, ou que apresentam uma saída além da nominal, as perdas variáveis são elevadas em relação a saída, e o rendimento é baixo. Quando as perdas variáveis se igualam as

perdas fixas, o rendimento do autotransformador é máximo. Sendo assim, a curva do rendimento eleva-se com a saída a vazio, até o máximo, com metade da carga nominal e cai novamente com cargas acima da nominal (KOSOW, 1982).

O ensaio a vazio e o ensaio de curto circuito são essenciais para averiguar o rendimento de um transformador e de um autotransformador, bem como o desenvolvimento do cálculo de regulação de tensão. Os dados obtidos por esses ensaios são de suma importância, pois, por meio deles é possível também realizar os cálculos de rendimento diário do equipamento (CHAPMAN, 2000).

Para o estudo mais profundo do rendimento desse equipamento, o autotransformador foi analisado como se o mesmo fosse colocado em interface a um sistema fotovoltaico. Dessa forma, basicamente a estrutura que constitui um sistema fotovoltaico é composto de 3 (três) principais equipamentos: Conjunto de módulos fotovoltaicos, inversor e medidor bidirecional. Dentro dessa estrutura, o rendimento do autotransformador será calculado de forma a simular sua aplicação dentro de um sistema fotovoltaico. O autotransformador se encaixaria entre o inversor e o medidor bidirecional.

Simulando um autotransformador conectado durante 24 horas a um SFCR, que ao longo do dia entrega, em períodos de horas determinados, frações diferentes de energia para o autotransformador, pode-se observar o rendimento que esse equipamento apresentará ao longo desse dia. O quadro 11 representa as frações de cargas em um período de 24 horas que serão entregues ao autotransformador por um sistema fotovoltaico.

Quadro 11 - Rendimento Diário de um Sistema Fotovoltaico

Faixa horária	Duração (horas)	Fração de carga	FP da carga
0h às 6h	6	Trabalha a vazio	--
6h às 7h	1	20%	1
7h às 8h	1	80%	1
8h às 10h	2	90%	1
10h às 12h	2	95%	1
12h às 14h	2	100%	1
14h às 16h	2	95%	1
16h às 17h	1	80%	1
17h às 18h	1	60%	1
18h às 0h	6	Trabalha a vazio	--

Fonte: Autor

O rendimento diário de um autotransformador, no período de 24 horas, pode ser calculado por meio da equação (33)

$$\eta_d = \frac{\text{Energia Total entregue por um Autotrafo a Carga}}{\text{Energia Total recebida pelo Autotrafo}} \quad (33)$$

O rendimento diário pode ser calculado também por meio da equação (34).

$$\eta_d = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \text{etc}}{P_1 + P_2 + P_3 + P_{\text{Perdas (Total)}}} \quad (34)$$

Tendo que:

P_1, P_2, P_3 , e etc, são energias requeridas do transformador pelas diferentes cargas ligadas, para o período de 24 horas

$P_{\text{Perdas (Total)}}$ se refere a soma das energias perdidas (Perdas no núcleo e no cobre), para o período de 24 horas.

Desta forma, pode-se perceber que a energia perdida no período de 24 horas, se refere as perdas fixas para 24 horas, mais as perdas que variam diretamente com a carga flutuante nesse mesmo período de tempo, conforme mostram os quadros 12 e 13

Quadro 12 - Perda de Energia Diária Total em kWh do autotransformador

Fração de Carga (%)	Perdas no núcleo (W)	Perdas no enrolamento (W)	Perdas de potência (W)	Período de tempo (horas)	Perdas totais por fase (KWh)
A vazio	53,33	0	53,33	6	319,98
20	53,33	6,346	59,676	1	59,676
80	53,33	101,536	154,866	1	154,866
90	53,33	128,5065	181,8365	2	363,673
95	53,33	143,181625	196,511625	2	393,023
100	53,33	158,65	211,98	2	423,96
95	53,33	143,181625	196,511625	2	393,023
80	53,33	101,536	154,866	1	154,866
60	53,33	57,114	110,444	1	110,444
A vazio	53,33	0	53,33	6	319,98
Perda total de energia no período de 24 horas					2693,49

Fonte: Autor

Quadro 53 - Energia Total Diária entregue em kWh pelo SFCR ao autotransformador

Fração de Carga (%)	$\cos\phi$	Potência 3 ϕ transferida ao autotransformador (KW)	Período de tempo (horas)	Total de Energia (KWh)
A vazio	1	0	6	0
20	1	6000	1	6000
80	1	24000	1	24000
90	1	27000	2	54000
95	1	28500	2	57000
100	1	30000	2	60000
95	1	28500	2	57000
80	1	24000	1	24000
60	1	18000	1	18000
A vazio	1	0	6	0
Energia total requerida pela carga no período de 24 horas				300000

Fonte: Autor.

Utilizando a equação 34, pode-se calcular o rendimento diário de um autotransformador em interface a um sistema fotovoltaico.

$$\eta_d = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + etc}{P_1 + P_2 + P_3 + P_{Perdas (Total)}}$$

$$\eta_d = \frac{300 \text{ KWh}}{300 \text{ KWh} + 3 * 2693,49 \text{ KWh}}$$

$$\eta_d = 0,974$$

$$\eta_d = 97,4\%$$

De acordo com o resultado apresentado, pode-se perceber que se esse equipamento estiver em interface a um sistema fotovoltaico, ou seja, trabalhando em conjunto, se os módulos produzirem energia a rede, ao longo de 24 horas, variando a energia em períodos determinados, o autotransformador terá um rendimento diário de $\eta_d = 97,4\%$.

4.8 Considerações Finais.

Os ensaios realizados se mostraram extremamente eficientes para a determinação do rendimento do autotransformador. Os procedimentos realizados foram o ensaio a vazio e o

ensaio de resistência elétrica, para determinar o rendimento de um autotransformador de 30 kVA, observando diferentes níveis de corrente ao longo do experimento.

No ensaio a vazio, o procedimento experimental aconteceu de forma prevista, utilizando-se de um analisador de energia para realizar as medições necessárias do sistema. Já para encontrar as variáveis que envolvem o ensaio em curto-circuito foi necessário a utilização de outros métodos para encontrar esses parâmetros, incluindo um experimento denominado ensaio de resistência elétrica, que confirmou os valores encontrados de forma calculada para o ensaio em curto-circuito.

No que diz respeito ao rendimento do autotransformador, ele é definido para a situação de plena carga, ou seja, tensões e correntes nominais no secundário, sob um fator de potência especificado. Dessa forma, quando um autotransformador é alimentado com tensão e frequência constantes, as perdas no núcleo podem ser consideradas constantes, sem levar em conta a intensidade das correntes.

Quando há diferentes correntes fornecidas a um sistema, considerando o mesmo fator de potência, o rendimento do autotransformador irá variar somente pelas perdas nos enrolamentos.

No rendimento diário, foi possível observar que independente da energia que esteja sendo entregue ao autotransformador, advindo de um sistema fotovoltaico ou de qualquer outra fonte, se o valor dessa energia for suficiente para atingir qualquer fração de carga do autotransformador isso resultará em um rendimento satisfatório no decorrer de um período determinado.

5 CONCLUSÃO

O primeiro Capítulo desse trabalho apresentou a justificativa, objetivos e a metodologia que seria desenvolvida ao longo do trabalho. Foi apresentado que, hoje no mercado existem inversores de diversos tipos, mas que em sua maioria são inversores trifásicos de 380/220 volts, e que existem regiões do país que apresentam tensões trifásicas na rede de 220/127 volts. Para essas regiões seriam necessários inversores com a mesma capacidade de tensões da rede local, porém, esses equipamentos tem sua faixa de valores muito elevados o que deixaria um sistema fotovoltaico com o preço muito alto. Uma das soluções para esse problema é a aplicação de um autotransformador, pois, o seu custo é mais baixo do que os tipos de inversores necessários e o seu rendimento é maior do que o de um transformador convencional. No autotransformador, porém, existem perdas que precisam ser analisadas, pois como a geração de energia que um sistema fotovoltaico produz não é regular ao longo do dia, há a necessidade de entender se em condições de cargas variáveis, o autotransformador continuaria trabalhando em uma faixa de rendimento aceitável de entrega de energia a rede.

No Capítulo 2 (dois), foi descrito sobre toda a parte que envolve os sistemas fotovoltaicos, são eles: O que é geração distribuída, o que é um sistema fotovoltaico, como se dá a classificação de um sistema fotovoltaico, efeito fotovoltaico, o que são células fotovoltaicas, o que são módulos fotovoltaicos, quais os tipos de módulos, topologia de um sistema fotovoltaico, curvas características P_xV e I_xV , conversão CC-CA, interface a rede, medidores bidirecionais e a questão das problemáticas das perdas na geração de um sistema fotovoltaico.

No Capítulo 3 (três), foi realizado todo o referencial teórico que envolve o principal objeto de estudo do trabalho, o autotransformador. Nesse Capítulo, os assuntos tratados foram: O que é um autotransformador, como se dá o seu funcionamento, seu aspecto construtivo, perdas relacionadas ao equipamento, vantagens e desvantagens de um autotransformador, o autotransformador em interface a um sistema fotovoltaico, pesquisa de mercado (tipos e modelos) e dados fornecidos pelo fabricante.

Comparando um transformador isolado a um autotransformador, pode-se citar algumas vantagens ligadas a questões de rendimento que conseqüentemente resultam em economia, tais como, menor quantidade de ferro e cobre na fabricação do autotrafo, o que resulta em menores perdas, considerando os equipamentos nas mesmas condições.

Como os autotransformadores apresentam altos rendimentos na conversão de energia e por terem preços mais baixos que transformadores convencionais e inversores de sinais CC-CA 220/127 V, a sua aplicação em sistemas fotovoltaicos torna-se uma opção bastante viável.

Finalmente, no Capítulo 4 (quatro), foram feitas todas as partes experimentais do trabalho, realizando ensaios a vazio e o ensaio de resistência elétrica em um autotransformador de 30 kVA, calculando seu rendimento para fatores de potência unitário e em 0,92. Os rendimentos encontrados para esses dois fatores potência estão apresentados nos quadros 0 e 10.

Foi realizado também, o cálculo de rendimento diário desse autotransformador em interface a um sistema fotovoltaico, sistema esse que foi simulado, com diferentes frações de cargas ao longo de um período de 24 horas. O autotransformador demonstrou um rendimento diário de $\eta_d = 97,4 \%$.

Observando o rendimento diário foi possível, para este trabalho, concluir que independente da energia que esteja sendo entregue ao autotransformador, advindo de um sistema fotovoltaico, se o valor dessa energia for suficiente para atingir qualquer fração de carga do autotransformador isso resultará em um rendimento satisfatório no decorrer de um período determinado.

Para trabalhos futuros, pode-se utilizar um autotransformador com o mesmo nível de potência ou inferior, conectado a uma estrutura real de um sistema fotovoltaico instalado e observar, baseado na análise desse trabalho, se o comportamento do autotransformador irá se assemelhar aos dados aqui obtidos.

Pode ser feito também uma análise econômica detalhada de forma a mostrar qual o tempo de retorno financeiro que uma pessoa teria ao optar por um autotransformador no lugar de um inversor trifásico 220/127 volts no projeto de um sistema fotovoltaico.

Outro estudo interessante seria a análise dos reativos gerados que podem acontecer com a entrada do autotransformador junto ao SFCR.

Outra opção, seria realizar a comutação de diversos tipos e modelos de autotransformadores em interface a sistemas fotovoltaicos também diferentes, para poder assim, obter um mapeamento de rendimento em diversas estruturas diferentes.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marcelo Pinho. “**Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**”. 2012. 173 p. Tese (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA) - Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2012. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-28062012-102236/publico/DissertacaoMarceloPinhoAlmeida.pdf>>. Acesso em 16 nov. 2019.

ALVES, Luciano. “**Bancada Virtual para Testes de Inversores em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**”. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-35-Estrutura-de-uma-celula-fotovoltaica-Fonte-adaptada-de-9_fig15_333263996>. Acesso em: 15 nov. 2019.

ANDRADE, Juliano F; CORRÊA, Douglas R; VILEFORT, Leandro S; TOFOLI, Fernando L; MORAIS, Aniel S. “**Inversor Integrado com Autotransformador Dobrador de Tensão**”. Universidade Federal de Uberlândia – UFU; Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ. 2018.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482/2012**. 17/04/12 ed. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20482,%20de%202012%20-%20bip-junho-2012.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2019.

ANEEL. “**Decreto de Lei N° 5.163**”, 2004. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/dec20045163.pdf>>. Acesso em 15 nov. 2019.

ANEEL; OMM. “**Atlas de Energia Elétrica do Brasil**”, 2002. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em 15 nov. 2019.

ANEEL. “**Brasil Ultrapassa Marca de 1GW em Geração Distribuída**”, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877>. Acesso em 15 nov. 2019.

ANEEL. “**Outorgas e Registros de Geração**”, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mJhnKli7qcJG%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2>. Acesso em 16 dez. 2020.

ARAÚJO, Ana Júlia Nunes; RANK, Narah Iuata; BUENO, Talita Bezerra de Araujo. “**Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba**”. 2016. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2015_2_27/2015_2_27_final.pdf>. Acesso em 16 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16149: Esta Norma estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica e estabelece seus requisitos. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16150: Esta Norma especifica os procedimentos de ensaio para verificar se os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia estão em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16149. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 62116: O objetivo desta Norma é fornecer um procedimento de ensaio para avaliar o desempenho das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR). 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16274: Esta Norma estabelece as informações e a documentação mínimas que devem ser compiladas após a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Também descreve a documentação, os ensaios de comissionamento e os critérios de inspeção necessários para avaliar a segurança da instalação e a correta operação do sistema. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-1: Esta parte da ABNT NBR 5356, em conjunto com as ABNT NBR 5356-2, 3, 4 e 5, aplica-se a transformadores trifásicos e monofásicos (inclusive autotransformadores), excetuando-se certas categorias de pequenos transformadores e transformadores especiais. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5440: Esta Norma estabelece os requisitos das características elétricas e mecânicas dos transformadores aplicáveis a redes aéreas de distribuição, nas tensões primárias até 36,2 kV e nas tensões secundárias usuais dos transformadores monofásicos e trifásicos, com enrolamento de cobre ou alumínio, imersos em óleos isolantes com resfriamento natural. 2014.

AZEVEDO, Rodrigo Motta. TAVARES, Adilson Melcheque. “**Apostila de Transformadores I**”. Curso Técnico de Eletrotécnica. Instituto Federal Sul-Rio-Grandense. 2011. Disponível em:<<https://pt.slideshare.net/AlineCunha3/apostila-de-transformadores-i>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

BERTINI, Luiz Antonio. “**Transformadores – Teorias, práticas e dicas**”. 2003. Disponível em:

<http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/transformadores_teor_pratica_dicas.pdf>. Acesso em 15 set. 2019.

CARVALHO, Karolina Jorge Schwenck. **Sistemas fotovoltaicos distribuídos e integrados à rede**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 2012. Disponível em:<<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2012-1/2012092101-2012092101/file>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C., “**Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análise em Eletrônica de Potência Via Simulação**”, Revista Eletrônica de Potência, vol. 13, no. 3, pp. 141-146, 2008.

CHAPMAN S.J., 2000, “**Máquinas Elétricas**”, 3 ed., McGraw-Hill, Inc., Colômbia.

DAHONO, P. A.; KATAOKA, T.; SATO, Y., “**Dual Relationships Between Voltage-Source and Current-Source Three-Phase Inverters and Its Applications**”, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, vol. 2, pp. 559-565, 1997.

GAMA, Paulo Henrique Ramalho Pereira; AOKI, Alexandre Rasi; LUIZ, Ciceli Martins. et al. “**Geração Fotovoltaica de Energia no Brasil**”. Cigré – Brasil. Setembro de 2013. Disponível em:< http://www.cigre.org.br/archives/BT_13_final.pdf>. Acesso em 15 nov. 2019.

IEEE-STD.929-2000. “**Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaics Systems**”. [S.l.], 2000.

JANNUZZI, G. DE M.; VARELLA, F. K. DE O. M.; GOMES, R. D. M., “**Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**”. Campinas, Outubro 2009.

JOHN J. Grainger, Willian D. Stevenson, “**Power System Analysis**”, International Editions, McGrawHill Book, Columbus, Inc, 1994.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**, Vol. 1, 4ª edição, Ed. Globo, Porto Alegre, 1982.

LACERDA, V. S., **Sistema Monofásico de Aproveitamento Fotovoltaico Caracterizado por Baixa Distorção Harmônica Injetada na Rede e Rastreamento de Máxima Potência**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2010.

Lei dos Transformadores e o seu princípio de funcionamento. Disponível em:<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/lei_transf_3.pdf>. Acesso em 29 mar. 2020.

LUZ SOLAR. “**Como Funciona o Sistema Fotovoltaico**”. Disponível em:<<https://luzsolar.com.br/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico/>>. Acesso em 16 nov. 2019.

MONTEIRO, Maycon Alves; NICANOR, Marcos; NOGUEIRA, Rafael. et al. **Transformadores**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, Rondônia, 2012. Escola Senai de Cacoal.

MVA Transformadores. “**Autotransformadores**”. Disponível em:<<http://www.mvatransformadores.com.br/autotransformadores>>. Acesso em 30 mar. 2020.

NASCIMENTO, Felipe Silva. **Autotransformador**. Universidade Federal do Vale do Paraíba. Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo. São José dos Campo, SP, 2015.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa, n. 55 61, p. 46, 2017.

ROSA, Arthur. **O transformador**. Curso Superior de Engenharia de Controle e Automação. Instituto Federal de Santa Catarina, SC [20--]. Disponível em:<https://www.academia.edu/14497344/O_Autotransformador>. Acesso em: 15 set. 2019.

SEVERINO, M.; M. - **Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília - 2008.

SILVA, Lucas Fortunato Nunes. “**Princípio do funcionamento do Transformador**”. Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica – LAQEE. Universidade Estadual Paulista – UNESP. 2015.

Disponível em:<<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lqee1668/boletim-20.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

SILVA, Pedro Henrique Tronco; FLORIAN, Fabiana; PESTANA, Fernanda Augusto Baptistini. “**Estudo de Perdas em Sistemas Fotovoltaico**”. Universidade de Araraquara – UNIARA. 2018. Disponível em:<https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_pedrohenriquetronco_04dez2018.doc__3.pdf>. Acesso em 20 nov. 2019.

Tabela de Conversão de fios e Cabos AWG. “*American Wire Gauge*”. Disponível em:<http://www.brascopper.ind.br/dgq/Israel/Brascopper/conversao_awg_mm.pdf>. Acesso em 08 de nov. de 2020.

WISE Transformadores. “**Autotransformadores Trifásicos**”. Disponível em:<<https://www.wisetransformadores.com.br/autotransformador-trifasicos>>. Acesso em 31 mar. 2020.