

**INSTITUTO
FEDERAL**

Piauí

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS SÃO RAIMUNDO NONATO
CURSO LICENCIATURA EM MATEMÁTICA**

ELEUTERIO PEREIRA FILHO

**UTILIZANDO A MODELAGEM MATEMÁTICA NA IDENTIFICAÇÃO DA
TEMPERATURA INTERNA NO TOPO DO ÓLEO DO TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO DE 15 KVA**

SÃO RAIMUNDO NONATO - PI

2018

ELEUTERIO PEREIRA FILHO

**UTILIZANDO A MODELAGEM MATEMÁTICA NA IDENTIFICAÇÃO DA
TEMPERATURA INTERNA NO TOPO DO ÓLEO DO TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO DE 15 KVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do diploma
do Curso de Licenciatura em Matemática do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí. Campus São Raimundo Nonato.

Orientador: Prof. Esp. Sergiane Neves Monteiro

SÃO RAIMUNDO NONATO - PI,

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P436u Pereira Filho, Eleuterio
Utilizando a Modelagem Matemática na Identificação da Temperatura Interna no
Topo do Óleo do Transformador Monofásico de 15KVA / Eleuterio Pereira Filho - 2018.
51 f. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus São Raimundo Nonato, Licenciatura em
Matemática, 2018.

Orientadora : Profa Esp. Sergiane Neves Monteiro.

1. Transformador. 2. Lei de Joule. 3. Equilíbrio Químico. 4. Função. I.Título.

CDD 510

ELEUTERIO PEREIRA FILHO

**UTILIZANDO A MODELAGEM MATEMÁTICA NA IDENTIFICAÇÃO DA
TEMPERATURA INTERNA NO TOPO DO ÓLEO DO TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO DE 15 KVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do diploma
do Curso de Licenciatura em Matemática do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí. Campus São Raimundo Nonato.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Sergiane Neves Monteiro (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Francisco Teixeira Esteves
Instituição Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Amaya de Oliveira Santos
Instituição Federal do Piauí (IFPI)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de graduação aos meus pais, Eleutério Pereira Neto e Josélita Jérico Pereira, que sempre me motivaram a estudar, a minha esposa Kaliny Pereira N. Silva, que esteve sempre ao meu lado, me apoiando e passando confiança nos momentos mais complicados, meus dois filhos, Cecília Beatriz da S. Pereira e Lucas Raphael da S. Pereira, que proporcionaram inspiração, motivação e Fé para não desanimar com os estudos e se deixar abater pelo cansaço e meus Irmãos Erliton Jericó Pereira, Luzia Jisele Jerico Pereira, Jiseluzia Jerico Pereira e Aparecida Josilete Jerico Pereira, mesmo longe fisicamente sempre passaram força e incentivo para formação superior.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e servidores do IFPI do Campus São Raimundo Nonato, pois contribuíram para realização deste sonho.

Aos meus avós, que mesmo quando pequeno já me ensinaram que o melhor caminho na vida é os estudos. Em especial minha avó Alzira Avelina, mesmo com a idade avançada, sempre falava “devemos gostar de estudar”.

A minha orientadora, professora Sergiane Neves Monteiro, pela dedicação e orientação durante a elaboração deste trabalho.

Aos amigos do curso de Licenciatura em Matemática, 2014.1. Iniciaram junto comigo esta jornada. Onde vivenciamos bons momentos durante toda esta caminhada. Em especial a minha amiga Shelda Trindade, pelos trabalhos realizados e as tardes de estudo, proporcionaram grande aprendizado.

Agradeço acima de tudo o senhor Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”.*

Albert Einstein

RESUMO

O sistema de distribuição de energia é composto por vários equipamentos elétricos de diferentes finalidades. Entre estes equipamentos destaca-se o transformador, utilizado para possibilitar o fornecimento de energia nos pontos de consumo de forma segura e com qualidade. Este equipamento tem como função transformar a energia de um nível de tensão para outro, tornando viável o seu transporte. Entretanto, quando estes equipamentos estão em funcionamento nas áreas de consumo, não são monitorados quanto as elevações de temperatura interna que podem estar ocorrendo e comprometendo a sua vida útil. Os transformadores funcionam por muito tempo sem nenhuma indicação de grandezas como: temperatura, formação de gases e qualidade do óleo isolante. Conforme a NBR 5380 (1993) os valores de temperatura não podem ultrapassar os 50°C, pois compromete as características do óleo isolante e sua capacidade de refrigeração, deixando o equipamento vulnerável a queima. Muitas vezes quando um equipamento deste apresenta problema a distribuidora realiza a substituição sem identificar a causa da falha. É neste contexto que o presente trabalho indica uma função matemática capaz de identificar a temperatura interna no topo do óleo do transformador. Esta modelagem matemática foi desenvolvida após vários testes feitos no equipamento e possibilitou um diagnóstico mais preciso quanto ao seu funcionamento, uma vez que no topo do óleo concentram-se os elevados valores de temperatura aos quais está submetido.

Palavras-chave: Transformador. Lei de Joule. Equilíbrio Químico. Função

ABSTRACT

The electric power distribution is composed of several equipment of different purposes. Among these equipment stands out the transformer, used to enable the supply of energy at the points of consumption in a safe and with quality. This equipment has the function of transforming the energy from one level of voltage to another, making its transport feasible. However, when these devices are in operation in the areas of consumption, they are not monitored for the internal temperature rises that may be occurring and compromising their useful life. The transformers work for a long time without any indication of magnitudes such as: temperature, gas formation and quality of the insulating oil. According to NBR 5380 (1993) the temperature values can not exceed 50°C, because it compromises the characteristics of the insulating oil and its cooling capacity, leaving the equipment vulnerable to burning. Often when this equipment presents a problem, the distributor performs the replacement without identifying the cause of the failure. In this context that the present work indicates a mathematical function capable of identifying the internal temperature at the top of the transformer oil. This mathematical modeling was developed after several tests made on the equipment and made possible a more precise diagnosis as to its operation, since at the top of the oil the high temperature values to which it is submitted are concentrated.

Keywords: Transformer. Law of Joule. Chemical balance. Function

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fluxo do óleo dentro do transformador.....	17
Figura 2	Geração, Transmissão e Distribuição	21
Figura 3	Princípio da Lei de Faraday.....	23
Figura 4	Núcleo do transformador ideal.....	23
Figura 5	Relação de transformação.....	24
Figura 6	Circuito do transformador real.....	24
Figura 7	Transformador monofásico de 15KVA.....	26
Figura 8	Equilíbrio Químico.....	28
Figura 9	Princípio de Termodinâmica.....	29
Figura 10	Função Injetora.....	32
Figura 11	Função Sobrejetora.....	33
Figura 12	Função Bijetora.....	33
Figura 13	Logaritmo Natural.....	34
Figura 14	Câmera Térmica.....	36
Figura 15	Multímetro Digital.....	37
Figura 16	Sonda de Temperatura.....	37
Figura 17	Analisador de Grandezas Elétricas.....	37
Figura 18	Pontos de medição no transformador.....	38
Figura 19	Curvas de rendimento do transformador.....	40
Figura 20	Estrutura local da experiência prática.....	43
Figura 21	Imagem térmica do transformador.....	43
Figura 22	Fluxograma de Inspeção Preditiva.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados sobre a Tilápia do Nilo.....	31
Tabela 2	Carga instalada de 2,2KVA, Turno da manhã.....	47
Tabela 3	Carga instalada de 2,2KVA, turno da tarde.....	47
Tabela 4	Carga instalada de 5,1KVA, Turno da tarde.....	48
Tabela 5	Carga instalada de 8,5KVA, Turno da Manhã.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Curva de Regressão.....	31
Gráfico 2	Medições realizadas no dia: 17/01/2018.....	47
Gráfico 3	Medições realizadas no dia: 18/01/2018.....	47
Gráfico 4	Medições realizadas no dia: 25/01/2018.....	48
Gráfico 5	Medições realizadas no dia: 26/01/2018.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MRT	Malha Retorno Terra
NAND	Ventilação Natural
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

LISTA DE SÍMBOLOS

N Rendimento do transformador

$F.P$ Fator de Potência

I Corrente Elétrica

V Tensão elétrica

VA Potência Aparente

W Potência Ativa

Var Potência reativa

e Número de Euler

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
2 TRANSFORMADORES DE ENERGIA	20
2.1 Princípio de Funcionamento	22
2.2 Transformador Ideal.....	23
2.3 Transformador Real	24
2.4 Características construtivas do Transformador Monofásico	25
2.5 Efeito Joule	26
3 EQUILIBRIO TÉRMICO	28
3.1 Lei Zero da Termodinâmica.....	28
3.2 Condução térmica. Lei de Furier.....	29
4 MODELAGEM MATEMÁTICA	30
4.1 CONCEITO DE FUNÇÃO	31
4.1.1 Função Injetora ou Injetiva:	32
4.1.2 Função Sobrejetora ou Sobrejetiva	32
4.1.3 Função Bijetora ou Bijetiva.....	33
4.2 EQUAÇÃO MATEMÁTICA.....	33
4.3 O NÚMERO e	34
4.4 LOGARITMO NATURAL	34
5. O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E SEUS RESULTADOS	34
5.1 Inspeção visual externa	35
5.2. equipamentos DE MEDIÇÃO	35
5.3 Medição da temperatura	38
5.4 Inspeção Interna do transformador	39
5.5 Rendimento do Transformador	39
5.6 CONSTRUÇÃO DA FUNÇÃO CARACTERISTICA DO TRANFORMADOR....	40

5.7 Aplicando a função desenvolvida.....	43
5.8 Discursão dos resultados.....	45
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho buscou métodos matemáticos para análise do transformador elétrico, equipamento este inventado em 1831 por Michael Faraday – Físico e Químico Britânico (1791–1857), com a descoberta da indução eletromagnética em duas bobinas separadas eletricamente.

Hoje, praticamente em todos os lugares que frequentamos existe energia elétrica, devido a existência dos transformadores. A sua característica de transformação possibilitou o transporte da energia a longas distâncias, porém, mesmo com tamanha utilização estes equipamentos não são fabricados com dispositivos de monitoramento quanto ao regime de funcionamento (temperatura do óleo). Desta forma, este trabalho propõem um método matemático para identificação da temperatura interna no topo do óleo, possibilitando com isto, um diagnóstico mais preciso quanto as condições internas do transformador.

Os estudos foram realizados no transformador monofásico de distribuição, conforme NBR 5440 (2014), que possui as seguintes características: potência nominal 15KVA, classe de tensão 15KV com enrolamento do bobinado de alumínio e resfriamento do tipo ONAN. Tendo o mesmo com objetivo principal a identificação da temperatura interna no topo do óleo do transformador com o mesmo em funcionamento. Esta análise tem sua relevância, já que a própria norma NBR 5380 (1993) estabelece um valor de elevação da temperatura do óleo de 50°C, desta forma, um equipamento funcionando acima desta faixa tem a sua vida útil comprometida.

Uma análise previa de falhas internas no equipamento, ajuda a evitar prejuízos a companhia distribuidora de energia, devido a possibilidade de queima do equipamento e insatisfação da população que depende da energia elétrica. Como os transformadores são equipamentos robustos e blindados, quanto as partes energizadas internamente, e ficam instalados nas estruturas de distribuição, postes de concreto em vias públicas, o monitoramento da temperatura interna não pode ser realizado através de medição direta. Diante disto, propõem-se uma modelagem matemática que associa as temperaturas externas do transformador, medida em pontos do equipamento na parte superior e inferior, com a temperatura interna no topo do óleo.

Para realização deste estudo foi utilizado um transformador monofásico novo, que teve como carga até o momento somente a utilizada nos ensaios deste trabalho,

desta forma, procurando garantir o máximo possível as características de fábrica do transformador: quanto a classe de isolamento e as condições físico-química do óleo mineral. Evitando-se interferências nas medições devido ao desgaste natural do equipamento.

Sobre as manutenções realizadas nos transformadores monofásicos, destaca-se os três tipos principais: manutenção corretiva, trata-se da manutenção realizada após a ocorrência do defeito, muitas vezes para substituir uma peça danificada; manutenção preventiva, nesta manutenção também ocorre desligamento do equipamento, porém de forma programada para reaperto de conexões e substituição de componentes desgastados; e manutenção preditiva, nesta manutenção, usa-se a técnica de manutenção voltada para análise, consistindo em monitorar as características do equipamento periodicamente. Este tipo de manutenção esta relacionada diretamente com a proposta desta pesquisa, uma vez que o monitoramento da temperatura no topo do óleo possibilita identificar se o equipamento esta prestes a apresentar algum defeito.

Quanto aos testes realizados no transformador, obedeceu a seguinte lógica. Foi definido uma carga fixa ligada no secundário do transformador e padronizado a forma de coleta das leituras de temperaturas, conforme a seguinte metodologia: Utilizado uma carga fixa de 2,2KVA, conectada no secundário do transformador durante um intervalo de 08 horas ininterruptas, o valor da carga é monitorada instantaneamente através de um analisador de grandes elétricas instalado no equipamento.

Realizando medição de temperatura na parte externa superior do transformador, próximo a bucha do secundário, medição de temperatura na parte externa inferior do transformador e medição da temperatura interna no topo do óleo do transformador. Após coletas desta leituras, foi elaborado uma planilha das medições e gerado gráfico para análise do comportamento das temperaturas internas e externas em função da carga instalada e como elas se relacionavam entre se. Com os resultados obtidos, propor a utilização de uma função matemática que utilize as medições de temperaturas encontradas externamente e juntamente com o carregamento do equipamento possa estimar a temperatura interna no topo do óleo do transformador.

1.1 JUSTIFICATIVA

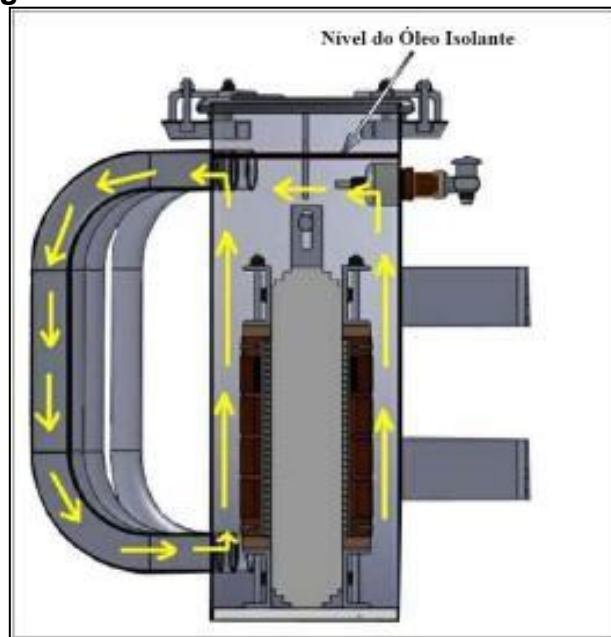
O transformador de distribuição é um dos principais componentes do sistema elétrico. Quando ocorre uma falha ou queima, gera toda uma insatisfação, pois além da área de cobertura do transformador ser ampla, sua falha compromete o funcionamento de vários estabelecimentos como: um sistema de bombeamento de água, clínicas, supermercados, igrejas, escolas, pátios de eventos e etc.

Desta forma, este trabalho torna-se muito importante, pois o mesmo possibilita que as equipes de campo das companhias elétricas possam, através de uma manutenção preditiva e utilização de uma função matemática, estimar o valor da temperatura no topo do óleo partindo de medições externas, sem interferir no funcionamento do transformador.

O benefício oferecido por esta pesquisa é a possibilidade de identificar uma falha no transformador com antecedência, antes que a mesma venha a provocar uma interrupção no fornecimento de energia. Para tanto utiliza-se um modelo matemático, tendo como base testes feitos no equipamento em questão, obtendo como produto final uma metodologia que relaciona as temperaturas medidas na parte externa do transformador com o seu carregamento instantâneo.

Conforme a NBR 5380 (1993), este tipo de transformador só pode sofrer elevação de temperatura no topo do óleo até 50°C, assim, este monitoramento faz-se necessário. Ao identificar um transformador de distribuição de 15KVA funcionando com sua temperatura interna acima de 50°C, pode-se programar a substituição do equipamento e encaminhá-lo para uma análise detalhada, com isto identificar as causas do aquecimento excessivo. Este método possibilita também que seja realizado um desligamento programado, sem que ocorra tamanha insatisfação ao consumidor, além de contribuir com redução de custo a companhia elétrica.

Para a construção deste trabalho centrou-se os estudos na temperatura do óleo na parte superior, pois ao analisar a elevação da temperatura neste ponto é possível um diagnóstico quanto ao seu funcionamento. Uma vez que, dentro do transformador ocorre a movimentação do mesmo devido ao seu aquecimento, ficando o óleo mais quente na parte superior, por ser menos denso, e a parte mais fria ficando na parte inferior, devido a ser mais denso, como ilustra a figura abaixo.

Figura 1: Fluxo do óleo dentro do transformador

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgGtsAK/tfc-manutencao-se-puc-goias?part=2>

Conforme a NBR 5440(2014) o óleo mineral dentro do transformador de distribuição tem duas funções importante: a de isolamento as partes vivas dos condutores e de resfriamento do equipamento, absorvendo o calor gerado internamente, calor este gerado por efeito joule. Algumas situações que servem de exemplos são: aquecimento interno, ocorrência de sobrecarga no circuito, conexão folgada ou curto circuito entre espiras de mesma fase. Independente do ponto de aquecimento interno, o óleo mineral estará sempre procurando o equilíbrio químico interno, transportando o calor gerado pela falha para o topo.

Certamente, a utilização desta ferramenta de análise e identificação da temperatura no topo do óleo, conjuntamente com os trabalhos preventivos que já são realizados nos transformadores de distribuição, contribuirão para um fornecimento de energia mais confiável.

2 TRANSFORMADORES DE ENERGIA

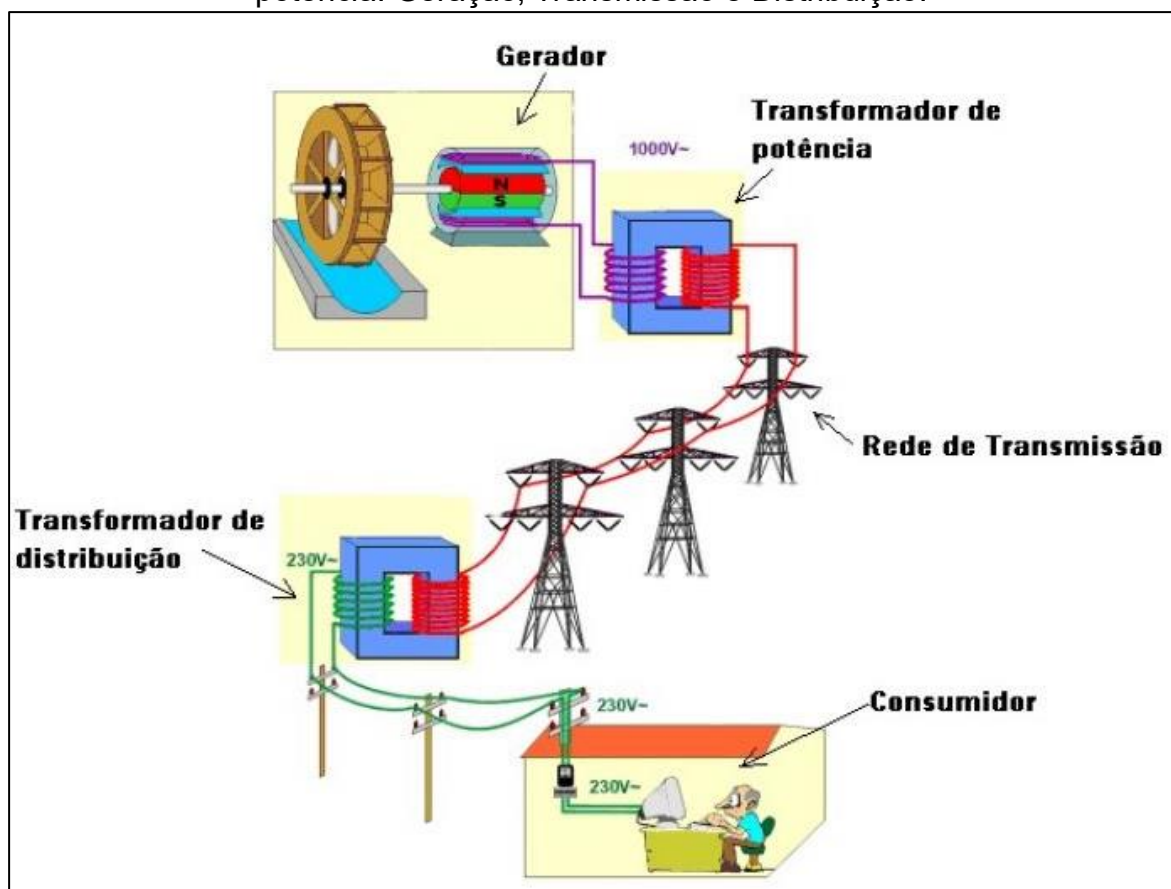
O transformador é um dos equipamentos principais do sistema de potência, a sua utilização ocorre em todas as etapas do sistema elétrico, inicia-se nos pontos de geração de energia (hidroelétricas, termoelétrica...) com o papel de transformar a energia elétrica gerada, de um nível de tensão na ordem de 4.16KV para um nível de tensão de 230KV ou 500KV. Esta elevação faz-se necessária devido a grande distância existente entre o ponto de geração e os centros de consumo.

A transformação realizada para elevar o nível de tensão, torna viável o transporte da energia elétrica, uma vez que elevando o nível de tensão reduz-se o custo com torres de transmissão e possibilita utilização de cabos elétricos com diâmetro menor, porém mantendo o mesmo potencial energético gerado. Nos grandes centros de consumo a energia é mais uma vez transformada, porém desta vez, para rebaixar o nível de tensão a valores conforme a carga a ser atendida.

Nesta fase, chega no nível de tensão adequado para o sistema de distribuição de energia (69/34.5/13.8/19.9 e 7.97KV), porém ainda ocorre mais uma transformação nas áreas de consumo, exemplo: Os transformadores recebem o nível de tensão de 13.8KV e realiza a última etapa da transformação para o nível de tensão 380/220V, compatível ao funcionamento dos aparelhos elétricos. Todo este processo de rebaixamento do nível de tensão elétrico ocorre conforme a demanda a ser atendida e sua respectiva distância para as subestações.

Na figura 2 segue uma ilustração das três etapas principais que compõem o processo de geração, transmissão e distribuição de energia, sendo apresentado o transformador em dois pontos, no início do processo (nível de tensão compatível a transmissão) e no final (nível de tensão compatível ao ponto de entrega). Este modelo é muito utilizado devido está relacionado diretamente com o custo benefício que envolve a utilização da energia elétrica.

Figura 2: esquemática das três principais etapas que compõem o sistema de potência: Geração, Transmissão e Distribuição.



Fonte: <<http://www.sigmatransformadores.com.br/o-transformador/>>.

O processo de geração de energia, ilustrado na figura acima, ocorre em virtude da força potencial da água, que aciona a turbina acoplada ao gerador de corrente alternada. Como o nível de tensão gerado nas usinas hidroelétricas é baixo para ser transmitido a longa distância, faz-se necessário o uso do transformador elevador, que mantém a potência gerada e eleva o valor da tensão para o nível de transmissão. No ponto de consumo, onde a energia elétrica chega com nível de tensão elevado, o transformador baixa o nível de tensão, fazendo-o compatível ao sistema de distribuição, assim chegando até as residências.

Nos transformadores de distribuição monofásico com nível de tensão do primário de 7.97KV é onde concentra-se esta pesquisa, mais precisamente nos transformadores com potência de 15KVA secundário de 440/220V, muito utilizados na área rural dos municípios, em virtude de concentração de pontos de suprimento de energia onde não demanda de um fornecimento trifásico. São conhecidos pelo tipo monofásico MRT, definição esta devido ao seu princípio de funcionamento que utiliza a malha do terra como referencial para o nível de tensão.

O primário do transformador recebe somente uma fase com potencial projetado em relação a terra (malha de aterramento feita no local de instalação do equipamento).

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Os transformadores são dispositivos que funcionam através da indução de corrente elétrica de acordo com os princípios do eletromagnetismo, ou seja, ele funciona baseado nos princípios da Lei de Faraday-Neumann- Lenz. Michael Faraday (1831) foi o responsável pela criação da indução eletromagnética, que é possível criar uma corrente elétrica em um circuito uma vez que esse seja submetido a um campo magnético variável, e é por necessitar dessa variação no fluxo magnético que os transformadores só funcionam em corrente alternada.

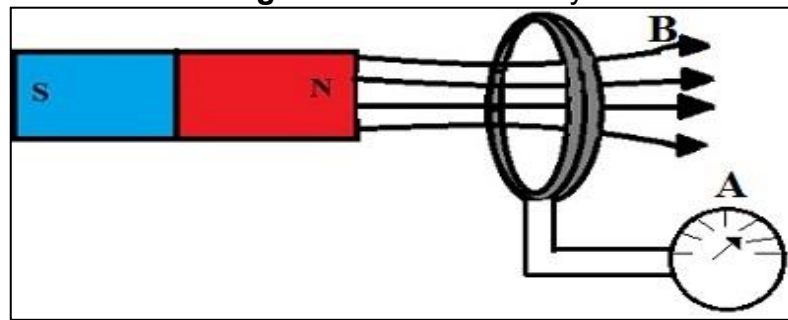
Os princípios que descrevem o funcionamento dos transformadores são dois:
1° Lei de Biot-Savart : Equação do eletromagnetismo que fornece o campo magnético gerado por uma corrente elétrica constante no tempo.

$$|B| = K_m \frac{|q| \cdot v \cdot \text{sen}\alpha}{r^2}$$

2° Lei da indução de Faraday: Um campo magnético variável no interior de uma bobina induz uma tensão elétrica nas extremidades dessa bobina (indução eletromagnética). A tensão induzida é diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo magnético do circuito. Através da fórmula apresentada é possível calcular o valor da força eletromotriz induzida. No Sistema Internacional de Unidades (SI) a unidade de medida para força eletromotriz é volts (v).

$$\varepsilon = \frac{-\Delta\phi}{\Delta t}$$

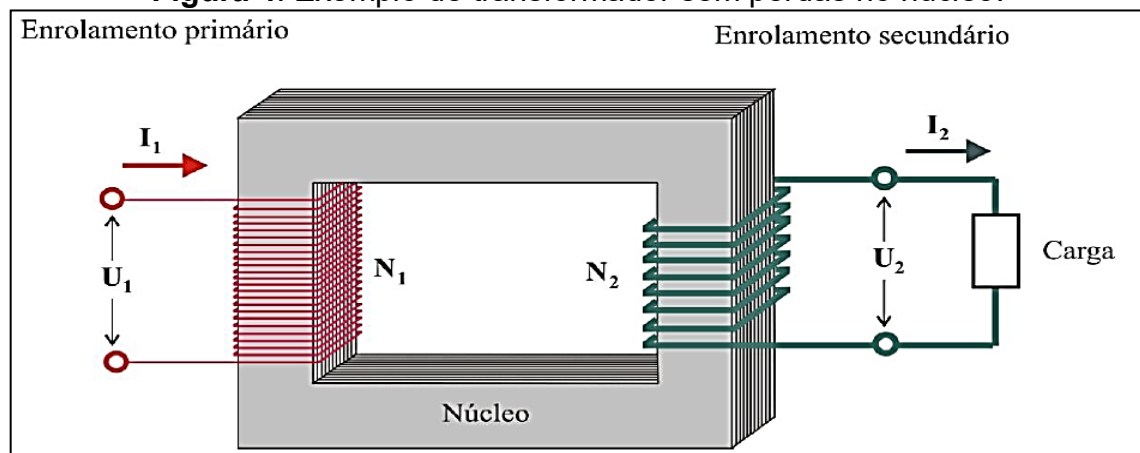
Na figura 03 abaixo, segue uma ilustração da aplicação da lei de Faraday, onde o movimento uniforme de um fluxo magnético sobre uma bobina, faz-se induzir uma tensão elétrica, por sua vez uma carga elétrica conectada nas extremidades desta bobina circula uma corrente elétrica.

Figura 3: Lei de Faraday

Fonte: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/inducacao-eletromagnetica.htm>>

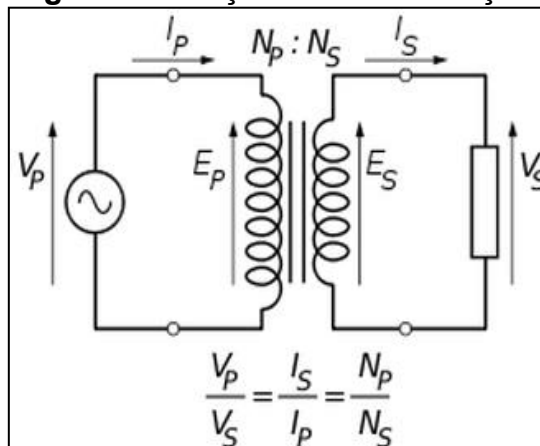
2.2 TRANSFORMADOR IDEAL

Um transformador é dito ideal quando o acoplamento entre as bobinas é perfeito, entre elas concatenam o mesmo fluxo. Neste tipo de equipamento não existe dispersão do fluxo gerado, isto quer dizer que a permeabilidade magnética no núcleo é infinita e o circuito magnético fechado. Admite-se nestes equipamentos que não existem perdas de qualquer natureza, nem nos enrolamentos, nem no núcleo do mesmo.

Figura 4: Exemplo de transformador sem perdas no núcleo.

Fonte: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAmXkAL/trabalho-transformadores>>.

A figura acima, apresenta um transformador ideal, onde a corrente alternada passando na bobina do primário cria um campo magnético. Como as bobinas do primário e secundário são ambas enroladas sobre um núcleo de material magnético de elevada permeabilidade, passam assim, o fluxo magnético entre as bobinas, gerando uma tensão e corrente induzida no secundário.

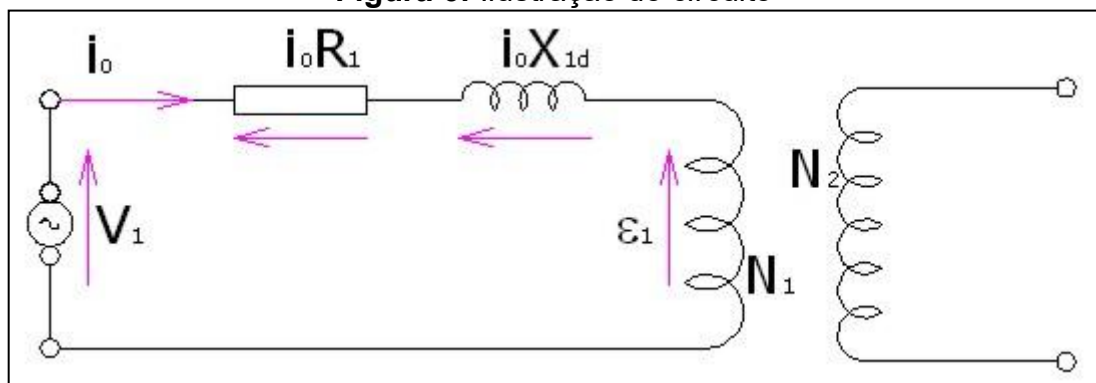
Figura 5: Relação de transformação.

Fonte: <<https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/aislamiento-galvanico>>

A equação apresentada na figura 5 estabelece que as relações das tensões primárias para as secundárias são proporcionais às relações dos números de espiras primárias para secundárias. Verifica-se então, a definição fundamental de um transformador como dispositivo que transfere energia de um circuito para outro. No transformador ideal, os volts-ampères drenados da fonte alternada, $V_1 * I_1$ são iguais aos volts-ampères transferidos ao secundário e entregues à carga, $V_2 * I_2$.

2.3 TRANSFORMADOR REAL

Neste transformador existem perdas no cobre devido à resistência dos fios elétricos e perdas no ferro por histerese, que surge a partir da energia necessário para alinhar os domínios magnéticos e perdas por corrente parasita devido a corrente induzida que flui no núcleo. Para reduzir as perdas no ferro utiliza-se núcleo laminado na fabricação destes.

Figura 6: Ilustração do circuito

Fonte: <http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3015/html/132_el_transformador_real.html>

No equipamento real existem perdas no enrolamento primário e secundário, perdas de reatância de dispersão no primário e secundário, perdas no núcleo e reatância de magnetização. Sendo este tipo de transformador os utilizados nas redes de distribuição elétrica para a transformação da energia, as perdas existentes internamente contribuem para o aquecimento do transformador e baixa o rendimento operacional.

Neste transformador a potência de entrada é igual a potência de saída mais as perdas.

2.4 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Elementos que compõem o equipamento:

- Uma bucha na alta tensão e três buchas na baixa tensão
- Óleo isolante: Óleo mineral isolante do tipo A
- Tampa e abertura para inspeção: O transformador deve ser desprovido de abertura para inspeção
- Válvula de alívio de pressão: Deve ser instalada na tampa principal do transformador, direcionada para o lado das buchas de baixa tensão, a válvula de alívio tem uma finalidade grande, caso ocorra uma elevada pressão interna.
- Orelhas de suspensão: Deve ter no mínimo duas e possuir resistência e dimensões adequados para ser içado.
- Suporte para fixação em poste: Deve estar soldado no tanque.
- Núcleo: Deve ser construído de chapas de aço silício.
- Enrolamento: Podem ser construído em cobre ou alumínio
- Radiador: Contribui no processo de resfriamento do transformador, onde facilita a troca de calor com o meio externo.

Figura 7: Transformador de 15 KVA

Fonte: <<http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/magnetix-brasil/produtos/eletronica/transformador-monofasico-para-trifasico>>

2.5 EFEITO JOULE

A lei de Joule é conhecida como efeito térmico, que trata a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo. Esta lei é uma homenagem a James Prescott Joule (1818-1889), que estudou o fenômeno em 1840.

O mesmo verificou que todo condutor, por onde percorre uma corrente elétrica sofre um aquecimento, devido a transformação da energia elétrica em energia térmica. O calor gerado é diretamente proporcional à resistência elétrica do condutor, ao quadrado da corrente elétrica que o percorre e ao tempo de condução da corrente.

expressão matemática

$$Q = I^2 * R * t$$

Onde:

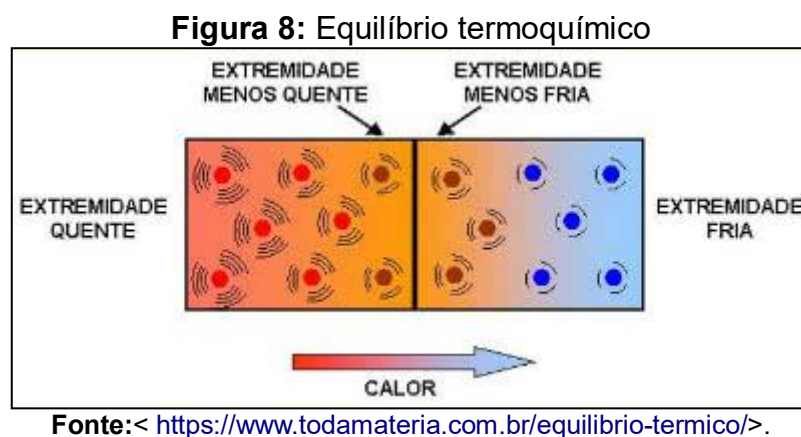
- Q é o calor gerado por uma corrente constante percorrendo uma determinada resistência.
- I é a corrente elétrica que percorre o condutor com determinada resistência.
- R é a resistência elétrica do condutor
- t é o tempo em que a corrente percorreu o condutor.

Esse efeito é uma das causas principais que envolve o custo benefício para

construções das torres de transmissão, possibilitando que a energia elétrica seja transportada a longas distâncias em tensões altas. Como já mencionado, maior tensão permite que a corrente seja menor para manter a mesma potência, e assim menor será a energia dissipada pelo efeito joule.

3 EQUILÍBRIO TÉRMICO

O equilíbrio térmico ocorre quando dois ou mais corpos atingem a mesma temperatura. Está relacionado com a transferência de calor espontânea (energia térmica) que ocorre entre dois corpos em contato. O mais quente transfere calor para o mais frio até que ambos tenham a mesma temperatura.



Esta troca de energia entre os dois corpos resulta na perda de energia térmica do corpo mais quente e ganho de energia do corpo mais frio, resultando no equilíbrio térmico. (RANKINE, 1853)

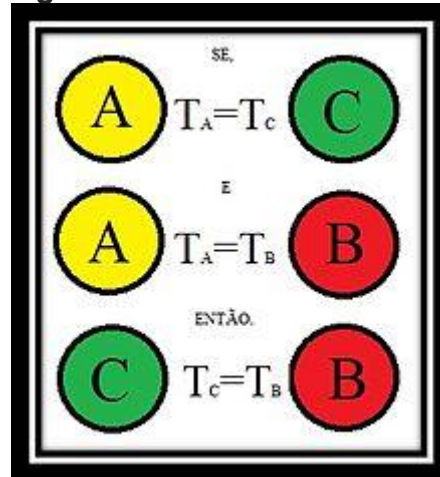
3.1 LEI ZERO DA TERMODINÂMICA

Esta lei afirma que se dois corpos A e B estão separadamente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo C, então A e B estão em equilíbrio térmico entre si. Ralph H. Fowler (1889-1944).

Conforme a Lei zero da Termodinâmica, duas temperaturas são ditas iguais quando nenhuma delas tende a transferir calor para outra. As palavras quente e frio foram criadas para facilitar o entendimento da sensação térmica. Exemplo: Se um dia frio tocarmos em um objeto de madeira e em um de metal, ambos à temperatura ambiente, teremos a impressão que o objeto de metal estará mais frio. Isso ocorre porque, como nosso corpo não está em equilíbrio térmico com eles, haverá troca de energia na forma de calor entre nosso corpo e os objetos. Como o metal é melhor condutor que a madeira, o calor será transferido mais rápido e é essa troca rápida de energia que nos dá a impressão de que o metal está mais frio.

A figura abaixo apresenta três objetos, onde o objeto “A” tem sua temperatura igual ao objeto “C”, por sua vez a temperatura do objeto “A” também é igual ao objeto “B”. Desta forma, pode-se afirmar conforme a Lei da Termodinâmica que os objetos “C” e “B” tem as temperaturas iguais.

Figura 9: Lei da termodinâmica.



Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lei_zero_da_termodin%C3%A2mica.jpg>

3.2 CONDUÇÃO TÉRMICA. LEI DE FURIER

A lei de Fourier permite quantificar a transmissão do calor entre os extremos da barra em regime permanente, em função das dimensões da barra, das características do material de que ela é feita e ainda das temperaturas nos seus extremos. A equação que traduz a lei de Fourier é:

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot (T_D - T_E)}{l}$$

Em que:

- Q é o débito de calor de D para E,
- A é a área da secção reta,
- l o comprimento da barra,
- T_D e T_E as temperaturas nos extremos da barra e
- k é a condutibilidade térmica do material de que é feita a barra.

Segundo Jean Baptiste Joseph Fourier (1822), a condução térmica ocorre quando a energia se transfere da região de alta temperatura para a região de baixa temperatura.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Segundo Bassanezi (2002), a modelagem matemática consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los interpretando suas soluções na linguagem do mundo real. Atualmente é muito utilizada em diversas áreas como física, biologia, química entre outros.

Estando diretamente relacionada com a solução de problemas, tendo como objetivo modelar um fenômeno, para tanto deve-se conhecer e analisar o seu comportamento e as taxas de variações, desta forma, propondo uma função que descreva o comportamento do fenômeno estudado. Com isto, é possível resolver muitos problemas com características complicadas de forma simples, obtendo-se respostas rápidas e precisas, por exemplo: as leis de Newton para mecânica.

A necessidade de resolver situações-problema no dia-a-dia, provocou o surgimento dos modelos matemáticos, pois compreender os fenômenos que nos cercam possibilita a previsão de tendências, segundo Bassanezi (2002).

Para Bassanezi (2002, p. 26), a modelagem matemática para resolução de um problema real deve seguir as sequências de etapas:

1. *“Experimentação* – Atividade essencial onde se processa a obtenção de dados. Os métodos experimentais, quase sempre são ditados pela própria natureza do experimento e objetivo da pesquisa.
2. *Abstração* – É o procedimento que deve levar à formulação do modelo matemático. Nesta fase procura-se estabelecer:
 - a. *Seleção das variáveis*: A distinção entre as variáveis de estado que descrevem a evolução do sistema e as variáveis de controle que agem sobre o sistema. Uma das exigências fundamentais da pesquisa é que os conceitos(variáveis) com as quais se lida sejam claramente definidos.[...]
 - b. *Problematização*: [...] Enquanto que a escolha do tema de uma pesquisa pode ser uma proposta abrangente, a formulação de um problema é mais específica e indica exatamente o que se pretende resolver.
 - c. *Formulação de hipóteses*: as hipóteses dirigem a investigação e são comumente formulações gerais que permitem ao pesquisador deduzir manifestações empíricas específicas [...]. A geração de hipóteses se dá de vários modos: observação dos fatos, comparação com outros estudos, dedução lógica, experiência pessoal do modelador, observação de casos singulares da própria teoria, analogia de sistemas etc.[...]
3. *Resolução* – O modelo matemático é obtido quando se substitui a linguagem natural das hipóteses por linguagem matemática coerente, é como num dicionário, a linguagem matemática admite sinônimos que traduzem os diferentes graus de sofisticação da linguagem natural [...].
4. *Validação* – É o processo de aceitação do modelo proposto, nesta etapa, os modelos juntamente com as hipóteses que lhes são atribuídas, devem ser testados em confronto com os dados empíricos, comparando suas soluções e previsões com os valores obtidos no sistema real [...].
[...]A interpretação dos resultados obtidos através dos modelos pode ser feita com o uso de gráficos das soluções que facilita avaliar as previsões ou mesmo sugerir um aperfeiçoamento dos modelos.

5. *Modificação* – Alguns fatores ligados ao problema original podem provocar a rejeição ou aceitação dos modelos. Quando os modelos são obtidos considerando simplificações e idealizações da realidade, suas soluções geralmente não conduzem as previsões corretas e definitivas. [...] O aprofundamento da teoria implica na reformulação dos modelos, Nenhum modelo deve ser considerado definitivo, podendo sempre pode ser melhorado, e agora poderíamos dizer que um bom modelo é aquele que propicia a formulação de novos modelos [...].”

Segue, para efeitos de ilustração do processo de modelagem, o exemplo das Tilápias do Rio Nilo encontrado em Bassanezi (2002, p.52):

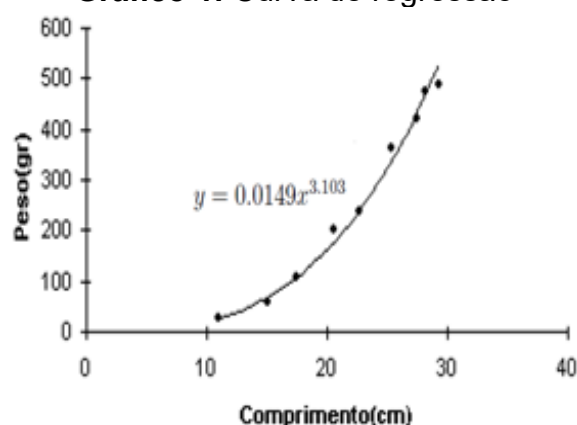
“A tabela abaixo nos dá em ordem crescente, o peso médio e o comprimento da Tilápia do Nilo – peixe de origem africana e bem adaptado em nossas águas – em relação à sua idade. Considerando as variáveis: peso médio y e o comprimento x , podemos relaciona-las num gráfico, onde a curva de relação estatística (curva de regressão), indica a tendência geral entre o peso médio e o comprimento da espécie estudada. Podemos, neste caso, observar que a maioria dos pontos não estão sobre a curva.

Tabela 1: Dados sobre a Tilápia do Nilo

t: idade	x: comp. médio	y: peso médio
0	11.0	26
1	15.0	59.5
2	17.4	105.4
3	20.6	200.2
4	22.7	239.5
5	25.3	361.2
6	27.4	419.8
7	28.2	475.4
8	29.3	488.2

Fonte: Bassanezi (2002)

Gráfico 1: Curva de regressão



Fonte: Bassanezi (2002)

Relações estatísticas são frequentemente utilizadas quando não se tem exatidão de uma relação funcional. Uma cursa de tendência pode ser o primeiro passo para uma Modelagem. Uma relação funcional, obtida através de um ajuste dos dados, propicia condições para a elaboração de hipóteses que levam à formulação dos modelos matemáticos. $p(l) = bl^A$

É uma relação funcional entre o comprimento e o peso do peixe que incorpora a taxa de metabolismo “ b ” e a forma do peixe “ A ”. Onde com os dados específicos tem-se: $p(l) = 0.0149l^{3.103}$ ”

4.1 CONCEITO DE FUNÇÃO

Define-se função como a relação entre dois ou mais conjuntos, estabelecida por uma lei de formação. (DANTE, 2012). Os elementos de um grupo devem ser relacionados com os elementos do outro grupo, através da lei de formação. As funções

possuem três características básicas: Domínio (trata-se de todos os elementos que pertence ao primeiro conjunto – conjunto A), Contradomínio (trata-se de todos os elementos que pertence ao segundo conjunto – conjunto B) e a Imagem (representa os elementos do contradomínio que possuem correspondente no domínio).

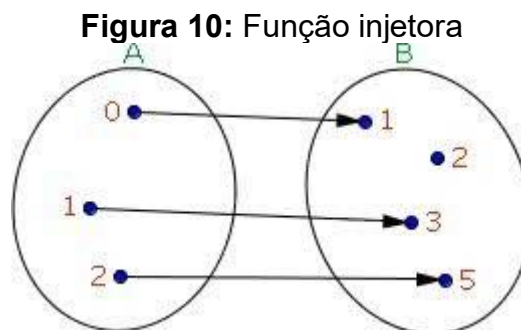
Características especiais do conjunto do domínio que definem ou não uma função:

- Todos os elementos do domínio devem possuir representação no conjunto do contradomínio.
- Um único elemento do domínio não deve possuir duas imagens

As funções podem ser classificadas em três tipos.

4.1.1 Função Injetora ou Injetiva:

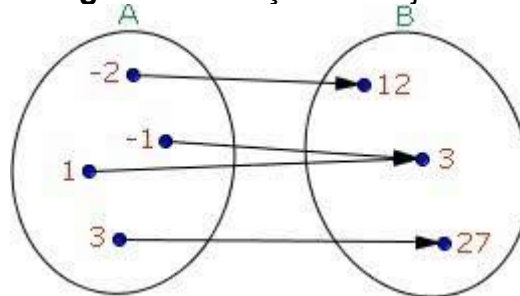
Cada elemento do domínio (A) associa-se a um único elemento da imagem (B). Podendo existir elementos do contradomínio que não são imagem, de acordo com Dante (2012). A figura abaixo exemplifica essa relação.



Fonte: <<https://www.todamateria.com.br/funcao-sobrejetora/>>

4.1.2 Função Sobrejetora ou Sobrejetiva

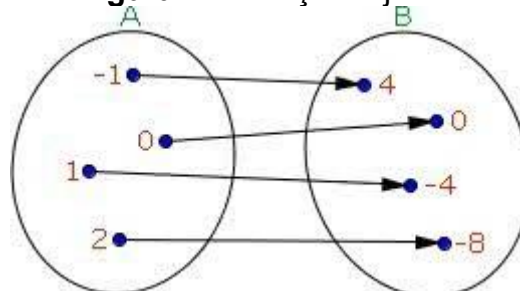
Todos os elementos do domínio possuem um elemento na imagem. Podendo acontecer de dois elementos do domínio possuírem a mesma imagem, segundo Dante (2012). Neste caso, imagem e contradomínio possuem a mesma quantidade de elementos, como está exemplificado na figura 11.

Figura 11: Função Sobrejetora

Fonte: <<https://www.todamateria.com.br/funcao-sobrejetora/>>

4.1.3 Função Bijetora ou Bijetiva

Essa função é ao mesmo tempo injetora e sobrejetora, pois, cada elemento de A relaciona-se a um elemento de B. Segundo Dante (2012) Nesta função, não acontece de dois números distintos possuírem a mesma imagem, e o contradomínio e a imagem possuem a mesma quantidade de elementos. Exemplo:

Figura 12: Função Bijetora

Fonte: <<https://www.todamateria.com.br/funcao-sobrejetora/>>

4.2 EQUAÇÃO MATEMÁTICA

É uma sentença matemática que possui igualdade entre duas expressões algébricas e uma ou mais incógnitas (valores desconhecidos) que são expressadas por letras. De acordo com o livro de Luiz Roberto Dante (2012)

As equações com uma incógnita são chamadas de equações do 1º Grau. Do tipo $ax = b$, com $a \neq 0$.

Já as polinomiais do 2º grau, que podem ser chamadas de funções quadráticas, são representadas na forma $ax^2 + bx + c = 0$. Estas equações podem ter até duas soluções reais distintas.

Equações do terceiro grau, chamadas de equações cúbicas, são as equações que podem ser colocadas na forma $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$. Possuem até três

soluções reais distintas.

As equações podem variar até o n -ésimo grau, tendo a forma geral: $a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 = 0$

4.3 O NÚMERO e .

Na matemática o número de Euler, denominado em homenagem ao matemático suíço Leonhard Euler (1707–1783), sendo este a base dos logaritmos naturais.

O número e é um número irracional e transcendente, como π (pi). Ele aparece na identidade de Euler, considerada a expressão mais “bela” da matemática, de acordo com Richard Feynman.

$$(e + 1)^{i\pi} = 0$$

A primeira indicação da constante foi descoberta por Jakob Bernoulli (1713).

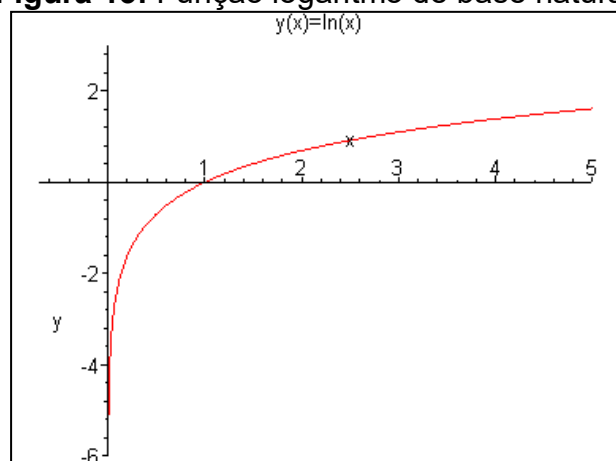
$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

Cujo valor é aproximadamente $e \cong 2,718281828459045235360287$.

4.4 LOGARITMO NATURAL

É o logaritmo de base e , e está definida para todos os números reais estritamente positivos, trata-se de uma função que é o expoente de uma potência de e , aparecendo frequentemente nos processos naturais. Esta função torna possível o estudo de fenômenos que evoluem de maneira exponencial.

Figura 13: Função logaritmo de base natural.



Fonte: <<https://blob.todoexpertos.com/uploads/md/c8ae6e82102631f12a000c0c83631238.gif>>

5. O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E SEUS RESULTADOS

Para os profissionais que trabalham no setor elétrico de distribuição de energia, existe toda uma responsabilidade quanto a qualidade da energia que está sendo fornecida nas unidades consumidoras, com isto, muitos estudos são realizados para assegurar o fornecimento contínuo e a qualidade da energia distribuída, entre eles segue alguns trabalhos que são realizados, o nível de tensão que chega no local de consumo, dimensionamento dos cabos elétricos, proteção nas redes elétricas contra curto circuito e capacidade dos transformadores de distribuição de energia elétrica. Porém, não é monitorado através das equipes de campo a temperatura interna no topo do óleo do transformador.

A pesquisa desenvolvida teve como objetivo disponibilizar mais uma ferramenta de diagnóstico, para auxiliar nos trabalhos de manutenção elétricas realizadas no campo. O método proposto para o transformador de 15KVA foi desenvolvido e mostrou importantes resultados quanto a indicação da temperatura interna do transformador na parte superior do óleo. Ela consiste em observação e análise térmica da temperatura em pontos diferentes do equipamento, feita por profissional técnico em Eletrotécnica com experiência nos trabalhos de campo. Foi dividida em três etapas:

- Inspeção visual externa do transformador
- Medição da temperatura em pontos diferentes do transformador
- Inspeção visual interna do transformador

Mesmo sendo um método simples, essa técnica se mostrou eficiente, auxiliando na identificação da temperatura do topo do óleo no transformador. A seguir será apresentada uma explanação de cada uma destas etapas.

5.1 INSPEÇÃO VISUAL EXTERNA

A inspeção visual externa do equipamento consiste em identificar avarias no transformador, tanto na parte do tanque quanto nas buchas do primário e secundário do equipamento, tem a finalidade também de identificar vazamento de óleo, corrosão e a presença de elementos estranhos nas proximidades do transformador.

5.2. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Para a coleta dos dados na parte externa, lateral do transformador, e interna, óleo, foram utilizados os seguintes instrumentos de medição:

1. Câmera térmica pontual FLIRT E60. Esta câmera possui um exclusivo micro sensor térmico da FLIR, permitindo a visualização da propagação do calor, de modo que direciona o local exato de maior temperatura, deste modo os pontos quentes são facilmente detectáveis.

Figura 14: Câmera Térmica FLIRT E60



Fonte: <<http://www.flir.es/cs/display/?id=42602>>

Com a utilização deste equipamento foi possível realizar todas as medições nos pontos definidos na parte externa do transformador, utilizando o ponteiro laser. Sua capacidade de medição varia de: -20° a 650°.

2. **Multimeter VC 9805 e a sonda de temperatura:** Estes instrumentos foram utilizados para medição da temperatura no topo do óleo, através da medição direta. As medições foram realizadas com as pontas de teste da sonda tocando no óleo. Para monitoramento desta temperatura, definiu-se um ponto central na parte superior do óleo e todas as medições foram feitas no mesmo local. A Capacidade de medição do equipamento vai de: -20° a 1000°

Figura 15: Multimeter VC9805

Fonte: <<https://www.aliexpress.com/item/VC9805-Digital-Multimeter-LCD-Display-Back-Light-Ammeter-Voltmeter-Testing-Voltage-Current-Ohm-Meter-Thermometer/32850435973.html>>

Figura 16: Sonda de temperatura

Fonte: <<https://pt.aliexpress.com/item/2pcs-set-TP-01A-100cm-Length-Wire-Temperature-Test-Cable-K-type-Thermocouple-Sensor-Probe-for/32803206658.html>>

3 Medidor de grandezas elétricas: O analisador de grandezas elétricas, dispõem de cabos para medições do nível de tensão do circuito e sensor de corrente com alta precisão. Monitora as grandezas elétricas e armazena na memória para geração de relatórios e gráficos. É possível verificar as curvas instantâneas de tensão e corrente, indica também a potencia aparente, ativa e reativa do circuito.

Figura 17: PowerNET P-600

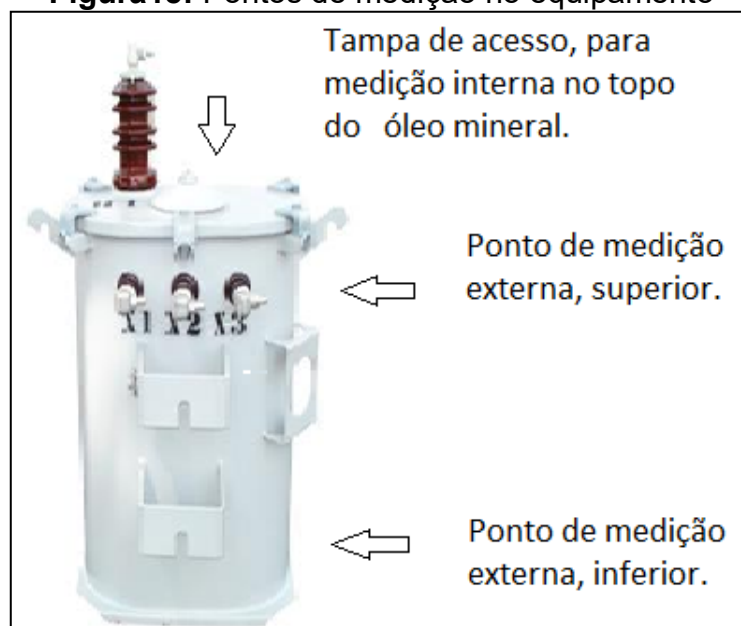
Fonte: <<https://loja.jsqe.com.br/analizador-de-grandezas-eletricas-ims-powernet-p600-g4>>

5.3 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Para realização das medições de temperatura foi padronizado o intervalo de coleta das leituras e definido os pontos de medições no equipamento. Detalhamento quanto aos procedimentos:

- Definição do intervalo de leituras, foi padronizado a realização das medições com intervalo de uma em uma hora, com o equipamento funcionamento em regime de carga fixa, 2,2KVA, F.P 0,21.
- Pontos de medição de temperatura, foi padronizado as leituras, conforme detalhamento abaixo, todas realizadas no mesmo horário:
 1. medição de temperatura externa, para este monitoramento, foi definido pontos fixos na parte superior do transformador, no mesmo nível das buchas do secundário e na parte inferior 15cm acima da base, conforme figura.
 2. medição de temperatura interna, quanto a esta medição, foi verificado a temperatura do óleo no nível superior, na parte central de acesso ao óleo após abertura da tampa de inspeção do transformador, conforme figura.
 3. medição da temperatura ambiente, coletada por aparelho de medição instalado no mesmo ambiente do transformador.
 4. Ilustração dos pontos de medição no equipamento:

Figura18: Pontos de medição no equipamento



Fonte: <<http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/magnetix-brasil/produtos/eletroeletronica/transformador-monofasico-para-trifasico>>

5.4 INSPEÇÃO INTERNA DO TRANSFORMADOR

A inspeção interna do equipamento consiste em identificar o nível do óleo, sua aparência, formação de sujeiras dentro do transformador, borra no óleo, ferrugem e ausência de escoamento.

Este tipo de inspeção é para ser realizado somente com o equipamento fora de operação, uma vez que conforme NR10 (segurança no trabalho com equipamentos elétricos), devemos manter a distância mínima de um metro das partes energizadas, devido ao nível de tensão de entrada.

5.5 RENDIMENTO DO TRANSFORMADOR

O rendimento no transformador de distribuição é a razão entre a potência de saída e a potencia de entrada, onde por sua vez, a potência de entrada é igual a potencia de saída mais as perdas no transformador. Quanto menor as perdas internas no transformador melhor será o seu rendimento.

$$n = \frac{P_S}{P_S + P_E}$$

Onde:

n – Rendimento do transformador

P_S . –Potência de saída

P_E - Perdas

As perdas no transformador são divididas em dois tipos:

- 1- Perdas fixas, são as perdas no núcleo do transformador
- 2- Perdas variáveis, são equivalentes as perdas no cobre, em função da corrente no secundário do transformador.

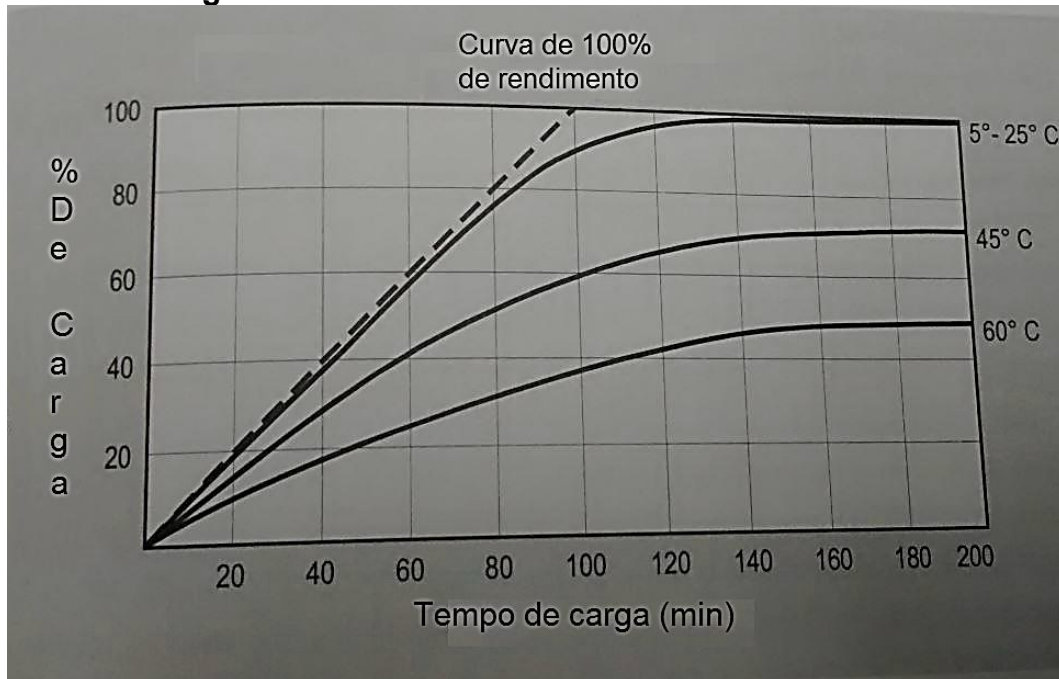
De acordo Kosow (1993), no livro de maquinas elétricas e transformadores, o rendimento do transformador obdece o seguinte comportamento: para cargas relativamente leves as perdas fixas são elevadas em relação à saída, e o rendimento é baixo; sobre cargas pesadas (saída além da nominal) as perdas no cobre são elevadas em relação a saída e o rendimento é novamente baixo.

O rendimento máximo, evidentemente, ocorre a um valor de carga para o qual as perdas fixas igualam as perdas variáveis. Portanto a curva do rendimento, eleva-se desde zero até um máximo à, aproximadamente metade da carga nominal, e cai

novamente para cargas pesadas.

Diante disto, observa-se que o rendimento do transformador apresenta uma curva exponencial, no instante inicial onde está sendo acrescentado carga no secundário. O gráfico da figura abaixo representa o comportamento do rendimento neste intervalo, em virtude de uma potência de saída maior.

Figura 19: Curvas de rendimento do transformador



Fonte: <<http://eletrotecnicaatual.blogspot.com.br/2015/01/>>

5.6 CONSTRUÇÃO DA FUNÇÃO CARACTERÍSTICA DO TRANSFORMADOR

A metodologia empregada apresenta um método eficiente para identificar o nível de temperatura no topo do óleo do transformador de distribuição de 15KVA monofásico do tipo NAND, servindo para aprimorar o diagnostico quanto ao funcionamento destes em relação ao valor da temperatura do óleo e seu carregamento.

É importante destacar que o método utilizado não interfere no funcionamento do mesmo, já que são medições externas que serve para mensurar com precisão o valor da temperatura no topo do óleo.

As medições foram realizadas durante um intervalo de 8hs diárias de funcionamento, efetuadas em turnos diferentes. Conforme programação:

- Turno manhã, início as 06:00hs e termino as 14:00hs

- Turno a tarde, início as 10:00hs e término as 18:00hs
- Turno a noite, início as 18:00hs e término as 02:00hs

A definição destes intervalos, foi adotada após a realização dos primeiros testes no transformador, onde verificou-se que tanto o valor interno do calor, gerado pelo efeito Joule aquecendo o bobinado do transformador e provocando elevação da temperatura do óleo, como a interferência da radiação solar que também interfere no aquecimento interno do óleo. Por essa razão realizou-se o monitoramento das temperaturas no turno da noite, sem a incidência da radiação solar, somente o aquecimento proporcional a carga instalada, com carregamento de 22%. Além de medições durante o dia, verificando a variação de temperatura que ocorre no óleo do transformador com a carga desligada, somente o calor gerado da radiação solar.

Após análise do comportamento destas duas etapas, passou-se a monitorar a temperatura do óleo com as duas fontes de calor agindo ao mesmo tempo. Deste modo, provocado pelo efeito Joule (dissipação do calor devido a passagem de corrente elétrica), com carga fixa e o calor proveniente da radiação solar.

Verificou-se um comportamento na elevação da temperatura do óleo da seguinte forma: quando a temperatura superior e inferior cresce na parte externa do equipamento, a temperatura no topo do óleo também aumenta, porém de forma exponencial; quando a temperatura superior e inferior na parte externa do transformador diminui, a temperatura no topo do óleo também diminui, de forma exponencial. Comportamento este, identificado após construção dos gráficos através das medidas de temperaturas coletadas

Diante desta informação, foram analisados os valores das medições realizadas no transformador, relacionando as medições externas e suas correspondentes internas no topo do óleo do transformador.

Conclui-se que a temperatura do óleo do transformador em regime de funcionamento normal (sem avarias no equipamento) eleva-se em virtude do calor absorvido, através do efeito joule no bobinado do mesmo, que é por sua vez, proporcional a carga instalada e ao calor absorvido da radiação solar. Como o óleo interno está sempre trocando calor com o meio ambiente onde o equipamento encontra-se instalado, procurando o equilíbrio térmico, pode verificar-se uma forte relação entre as temperaturas internas e externas.

Como referência para definição da função matemática que descreve a elevação da temperatura no topo do óleo, proposta neste trabalho, foi analisado a

recomendação IEEE C57.(91/1995), que adota a proposta a partir dos estudos de Pierce(1994).

Segundo a proposta IEEE C57 (91/1995):

$$Q_{to} = Q_{ao} - \frac{\Delta Q_t/b}{2}$$

Onde,

Q_{to} = temperatura do fluido no topo do tanque do equipamento, [°C].

Q_{ao} = temperatura média do fluido no tanque e no radiador, [°C].

$\Delta Q_t/b$ = diferença entre a temperatura do óleo no topo do tanque e a temperatura do óleo no fundo do tanque, [°C].

Porém esta proposta, não tem muita utilização prática através das equipes de campo na realização de inspeção nos transformadores, pois, para utilizá-la faz-se necessário valores de temperatura interna do óleo, do qual estes não dispõem.

Diante dos dados coletados nas medições e os gráficos gerados, observa-se o comportamento de uma função exponencial, verificando assim uma forte relação entre os gráficos da temperatura no topo do óleo e os obtidos através dos testes no equipamento com o gráfico que descreve o rendimento do transformador. Assim, foi possível chegar a equação abaixo que descreve a variação do valor da temperatura no topo do óleo para o transformador de 15KVA:

$$T_o = \frac{(T_s + T_i)}{2} + (T_s - T_i) \cdot e^{\frac{P_m}{P_t}}$$

Onde:

- T_o é a temperatura do topo do óleo
- T_s é a temperatura superior externa
- T_i é a temperatura inferior externa
- P_m é a potência medida em KVA
- P_t é a potência total do equipamento em KVA

Na equação acima a utilização da media aritmética das temperaturas externas ocorre devido a relação entre as temperaturas internas e externas estarem constantemente procurando o equilíbrio térmico, já a função exponencial natural é utilizada devido a temperatura no topo do óleo está relacionado diretamente com o carregamento do transformador.

Segue ilustrações de um dos momentos de coleta dos dados, realizadas nas atividades práticas.

Figura 20: Estrutura local da experiência prática



Fonte: dados da pesquisa

Figura 21: Imagem termica do transformador



Fonte: dados da pesquisa

Na figura 20 pode-se visualizar parte da estrutura local da experiência. A figura 21, por sua vez, traz a visualização térmica do equipamento durante uma das etapas da experiência.

5.7 APLICANDO A FUNÇÃO DESENVOLVIDA.

Utilizando os valores de temperatura das medições externas e internas realizadas conforme os dados da tabela 01, é possível verificar que o valor da temperatura interna no topo do óleo encontrado na medição direta, feita diretamente no óleo com instrumento de medição, equivale ao valor encontrado utilizando somente os valores de temperatura externa é aplicando a função desenvolvida.

Exemplo de situação comparativa:

Medição direta:

$$T_s = 35,6^\circ$$

$$T_i = 33^\circ$$

$$T_o = 37,3^\circ$$

Medição indireta (utilizando a função)

$$T_s = 35,6^\circ$$

$$T_i = 33^\circ$$

$$P_m = 2,2KVA$$

$$P_t = 15KVA$$

$$T_o = \frac{(35,6 + 33)}{2} + (35,6 - 33) \cdot e^{\frac{2,2}{15}}$$

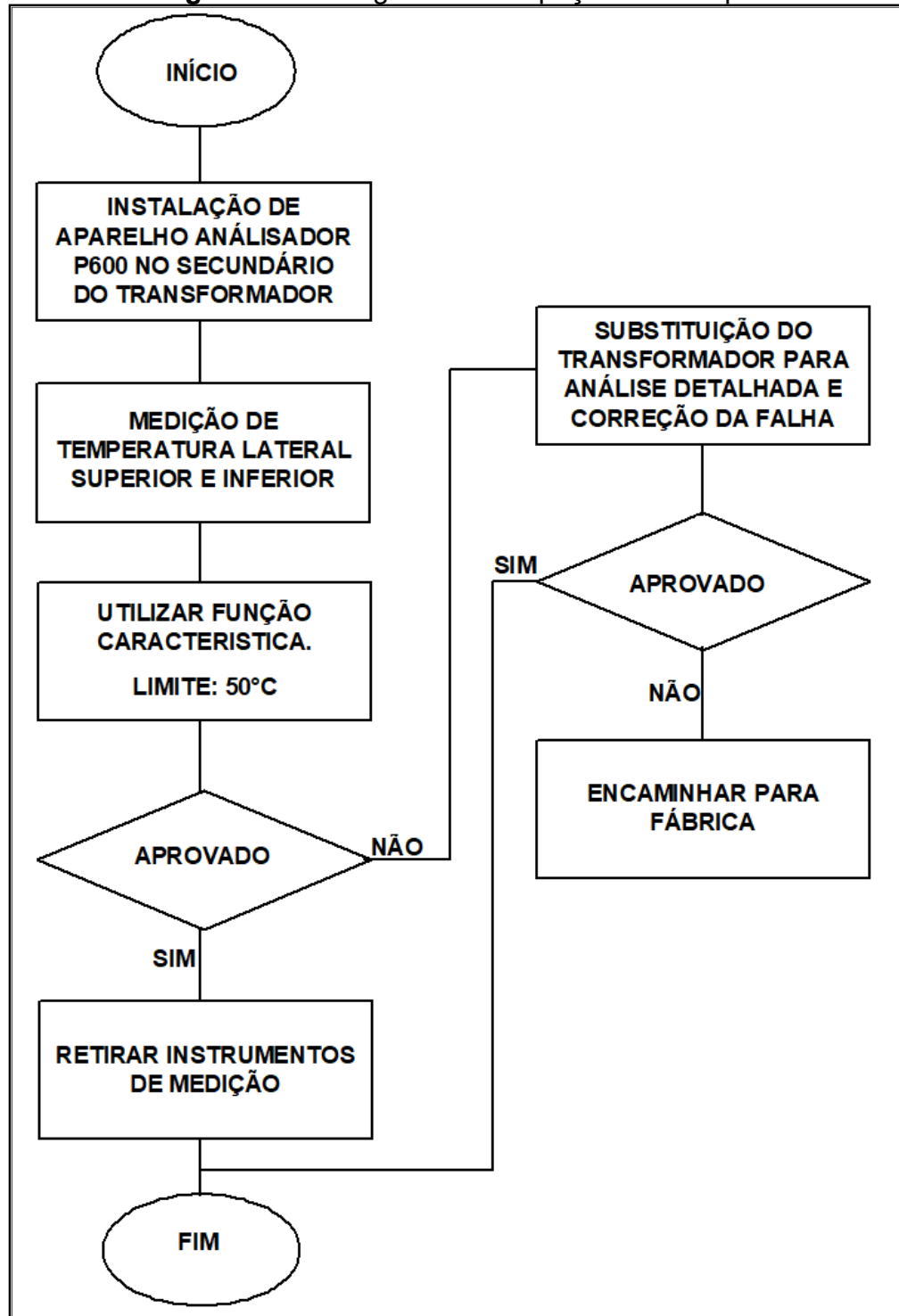
$$T_o = 37,3^\circ C$$

Comprovando, com isto, a eficiência do método proposto. Aplicando o mesmo procedimento nos valores de temperatura externas, encontrados nos demais horários

com as cargas diferentes 5,1KVA e 8,5KVA , verifica-se nas tabelas 03 e 04 que a função desenvolvida para o valor da temperatura do óleo satisfaz a proposta de identificação da temperatura interna.

Segue abaixo, um fluxograma ilustrativo quanto aos procedimentos para realização da inspeção preditiva em campo e aplicação da função característica.

Figura 22: Fluxograma da inspeção em campo



Fonte: Dados da pesquisa

5.8 DISCURSÃO DOS RESULTADOS

É possível verificar nos resultados obtidos após os testes no transformador com carga fixa de 2,2KVA, que a equação desenvolvida oferece resultados bastante satisfatória quanto a temperatura interna no topo do óleo do transformador de 15KVA. A equação desenvolvida apresenta resultados praticamente idênticos a temperatura medida diretamente no óleo. Testes estes realizados em dias diferentes com equipamento exposto as temperaturas ambientes também diferentes.

Após definição da equação foi realizado testes também com cargas diferentes, expondo o transformado a outros carregamentos, são eles 34% e 57% onde verificou-se também a eficiência da equação para estimativa do valor da temperatura no topo do óleo, sem interferir no funcionamento do equipamento.

O objetivo deste trabalho como já mencionado era a identificação da temperatura no topo do óleo, sem interferir no seu funcionamento, porém com esta informação pode-se dar um passo ainda mais importante quanto ao diagnóstico deste equipamento: determinando se este equipamento está funcionado em regime forçado ou não.

Uma vez que identificando que o transformador está trabalhando com carga abaixo de 100% do carregamento, condição ideal considerando características do produto, porém identificando através de uma manutenção preditiva realizada no equipamento uma temperatura interna acima de 50°C, comprova-se que o transformador está em funcionamento forçado, com aquecimento interno acima do normal. Desse modo, faz-se necessário sua retirada de operação para identificação da real causa deste aquecimento.

A retirada deste equipamento de operação evita uma falha maior sendo que este é um ponto principal de uma inspeção bem feita, assim reduz-se a insatisfação do consumidor e o custo com a manutenção de reparo do transformador, uma vez que a temperatura elevada é um sintoma de irregularidade, que caso não seja tratada, a falha pode comprometer todo o equipamento.

Um ponto importante para uma análise confiável da temperatura interna no topo do óleo está na coleta das temperaturas externas: tanto na medição superior como na medição inferior, sendo necessário que o equipamento de medição esteja calibrado e que no momento da leitura não ocorra nenhuma interferência.

Quanto ao questionamento: identificado a temperatura do óleo, é realmente possível prever uma falha do equipamento, falta de energia? Caso um equipamento esteja funcionando com temperatura acima dos 50°C no topo do óleo significa que o mesmo já vai queimar? Este trabalho foi direcionado para temperatura do óleo justamente por ele ter as características e função de resfriamento do transformador.

Em relação a saber se o equipamento já vai queimar, outros estudos fazem-se necessário para confirmação desta resposta, entre eles analise através do TTR e verificação da resistência de isolamento.

Por hora, é possível afirmar que o equipamento operando nestas condições está com sua vida útil comprometida, segundo a NBR 5380. Pois, sabe-se que o aquecimento excessivo compromete o papel isolante no interior do transformador e as características físico-químicas do óleo mineral. Desta forma, o transformador passa a fornecer energia não confiável, onde pode apresentar uma falha a qualquer momento

Segue abaixo as tabelas construídas através dos testes realizados no equipamento, realizadas através da medição direta, bem como a análise gráfica. Onde:

- T_s é a temperatura superior externa em °C
- T_i é a temperatura inferior interna em °C
- T_o é a temperatura do topo do óleo em °C
- T_A é a temperatura ambiente em °C

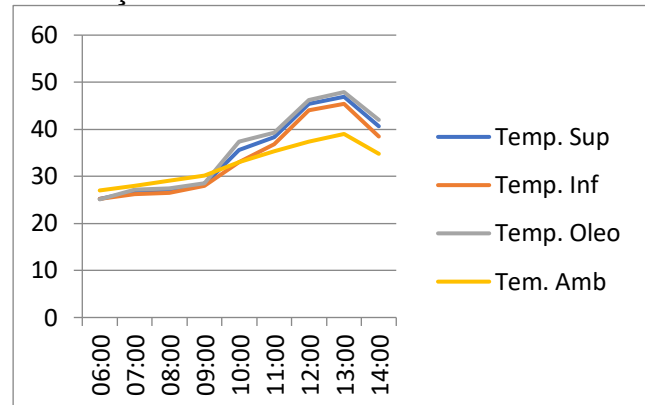
Tabela 2: ANÁLISE 1

EQUIPAMENTO: Transformador Monofásico de 15KVA				
CARGA INSTALADA: 2,2KVA				
DATA:17/01/2018				
HORÁRIO: 06:00 hs às 14:00 hs				
Horário	T_s	T_i	T_o	T_A
06:00	25,2	25,2	25,1	27
07:00	26,8	26,2	27,2	28
08:00	27,1	26,5	27,5	29
09:00	28,3	28	28,5	30,1
10:00	35,6	33	37,3	33
11:00	38,3	36,8	39,3	35,3
12:00	45,4	44	46,2	37,4
13:00	46,9	45,4	47,9	39
14:00	40,6	38,4	42	34,8

FONTE: Dados da pesquisa.

Gráfico 2:

Medições realizadas no dia: 17/01/2018



Fonte: Dados da pesquisa

No gráfico 2, foi observado que o comportamento da temperatura no topo do óleo do transformador cresce e decrescem no mesmo intervalo que as temperaturas medidas na parte externas e temperatura ambiente também cresce e decrescem.

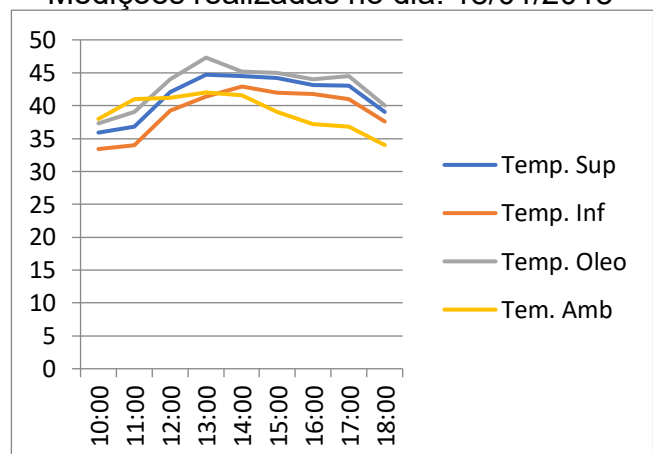
Tabela 3: ANÁLISE 2

EQUIPAMENTO: Transformador Monofásico de 15KVA				
CARGA INSTALADA: 2,2KVA				
DATA: 18/01/2018				
HORÁRIO: 10:00 h às 18:00 hs				
Horário	T_s	T_i	T_o	T_A
10:00	35,9	33,4	37,3	38
11:00	36,8	34	39	41
12:00	42,1	39,2	44	41,2
13:00	44,7	41,4	47,3	42
14:00	44,5	42,9	45,2	41,6
15:00	44,2	42	45	39
16:00	43,1	41,8	44	37,2
17:00	43	41	44,5	36,8
18:00	39	37,6	40	34

Fonte: dados da pesquisa

Gráfico 3:

Medições realizadas no dia: 18/01/2018



Fonte: dados da pesquisa

No gráfico 3, verifica-se inicialmente que a temperatura ambiente encontra-se acima das outras temperaturas monitoradas, porém com o passar do tempo (aquecimento interno devido ao efeito joule) a temperatura do óleo eleva-se ficando todo acima das demais.

Tabela contendo os dados das medições de temperatura externa e do topo do óleo com carga de 5,1 KVA e 8,5KVA.

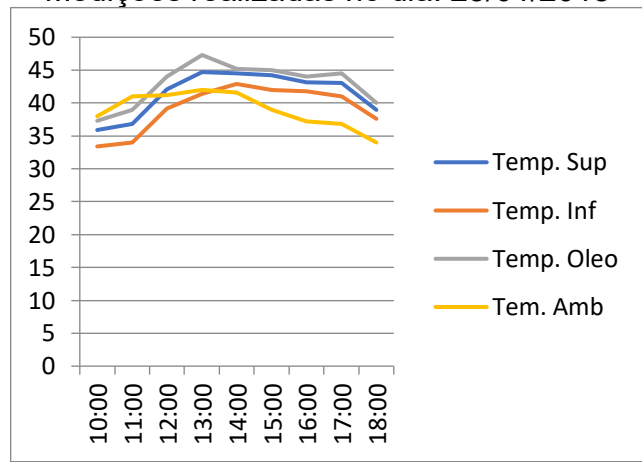
Tabela 4: ANÁLISE 3

EQUIPAMENTO: Transformador Monofásico de 15KVA				
CARGA INSTALADA: 5,1KVA				
DATA: 25/01/2018				
HORÁRIO: 10:00 hs às 18:00 hs				
Horário	T_s	T_i	T_o	T_A
10:00	36,2	34,3	37,9	39
11:00	37	34,5	39,2	40,1
12:00	40,4	38,7	42	41
13:00	45,2	43,4	46,8	41,8
14:00	43	41	44,8	41,2
15:00	42,5	39,3	45,4	41
16:00	40,4	37,4	43,1	39
17:00	37	35	38,8	36,7
18:00	35,6	33,8	37,2	34,4

Fonte: Dados da pesquisa

Gráfico 4:

Medições realizadas no dia: 25/01/2018



Fonte: dados da pesquisa

Verifica-se neste gráfico que as medições de temperatura no início do teste estão equivalentes as temperaturas medidas no final, mesmo após oito horas de funcionamento com o calor gerado internamente, comprova-se a troca de calor do equipamento com o meio ambiente.

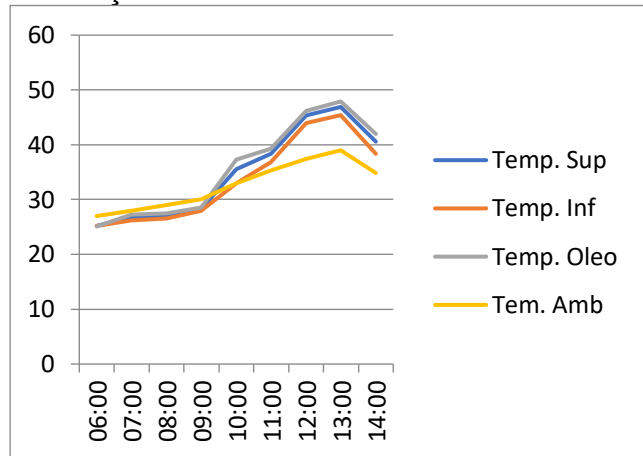
Tabela 5: ANÁLISE 4

EQUIPAMENTO: Transformador Monofásico de 15KVA				
CARGA INSTALADA: 8,5KVA				
DATA: 26/01/2018				
HORÁRIO: 06:00hs às 14:00hs				
Horário	T_s	T_i	T_o	T_A
06:00	24,3	22,5	26,5	25
07:00	27	25,1	29,4	28,4
08:00	27,6	26	29,7	29,2
09:00	29,5	28	31,4	30,5
10:00	36,2	34	38,9	36
11:00	41	39	43,5	38
12:00	45	43	47,5	42
13:00	44	42	46,5	41,3
14:00	42	39	45,7	39,3

Fonte: dados da pesquisa

Gráfico 5:

Medições realizadas no dia: 26/01/2018



Fonte: dados da pesquisa

No gráfico 5 verifica-se um comportamento da temperatura do óleo semelhante ao gráfico 2, mesmo com a carga aproximadamente 4 vezes maior.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem matemática proposta neste trabalho será de grande importância para o sistema de distribuição elétrico e empreendimentos particulares que dispõem deste equipamento, uma vez que a estimativa do valor da temperatura interna do óleo oferece uma informação muito importante sobre o regime de funcionamento do transformador.

Para alcançar este objetivo, foram realizadas várias medições e análise no transformador, em situações de carga e temperatura ambientes diferentes, onde foram elaborado gráficos dos valores encontrados para estudo detalhado do comportamento da temperatura do óleo. Sendo possível chegar a função ideal, após relacionar o carregamento do equipamento com os valores de temperatura encontrado.

Esta metodologia mostrou-se muito eficaz, pois, ao analisar as tabelas de medições realizadas verifica-se que a temperatura do óleo medida diretamente é aproximadamente a mesma encontrada utilizando-se a função desenvolvida.

O ganho que esta função propicia é bastante significativo, uma vez que indica os valores de temperatura sem a necessidade de desligar o equipamento. Tendo em vista também, a facilidade para a obtenção dos valores, podendo ser realizado por uma equipe operacional sem nenhuma complicação.

Cria-se, a partir da modelagem matemática, uma ferramenta poderosa para auxiliar no monitoramento dos transformadores de 15KVA. Aumentando com isto, a qualidade e eficiência das inspeções operacionais realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A LEI DE JOULE. **Universidade do Porto**: descrição. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/histel/Lei_Joule.pdf. Acesso em 09/01/2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(1993). **NBR5380**: Métodos de ensaio relativo a transformadores.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(2014). **NBR 5440**: Transformadores para redes áreas de distribuição.

BASSANEZI, Rodney Carlos, **Modelagem Matemática**. Teoria e Prática, São Paulo, 2015.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA (2015). **Transformadores para redes aéreas de distribuição –** Padronização e especificação. Disponível em: www.ceb.com.br/index.php/component/phocadownload/.../17-secao-03?...ntd-3. Acesso em: 05/01/2018.

COMPANHIA ENERGETICA DE MINAS GERAIS (2005). **Transformadores para redes de distribuição aéreas 15KV, 24,2KV e 36,2KV –** Especificação Técnica. Disponível em: <ftp://ftp.cemig.com.br/.../Documentos%20Tecnicos%20TKLD1/>. Acesso em 28/12/2017.

DANTE, Luiz Roberto. **Projeto Teláris**, Matemática. São Paulo, 2012.

FOURIER, Jean Baptiste. **Condução Térmica**, - Lei de Furier. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Condu%C3%A7%C3%A3o_t%C3%A9rmica. Acesso em 22/12/2017.

GELSON, Iezzi. **Matemática – volume único**. São Paulo, 1997.

HALLIDAY, Resnick e Walker. **Fundamentos de Física – Volume 2**, Rio de Janeiro: LTC, 2003.

KOSOW, Irving Lionel, **Maquinas Elétricas e Transformadores**, Porto Alegre, Globo, 1982.

Portal Toda Matéria, Google Analytics. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/equilibrio-termico/> Acesso em 27/12/2017.

STEWART, James. **Cálculo Vol. I - 4ª edição**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.