

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

MATHEUS ANTUNES PEREIRA

**Uso da Lógica Fuzzy na Estimação da Temperatura Máxima do Óleo e
Enrolamentos em Transformadores de Potência**

ITAJUBÁ – MG

2020

MATHEUS ANTUNES PEREIRA

**Uso da Lógica Fuzzy na Estimação da Temperatura Máxima do Óleo e
Enrolamentos em Transformadores de Potência**

Dissertação submetida à Universidade
Federal de Itajubá para a obtenção do grau
de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Benedito Isaias Lima

ITAJUBÁ – MG

2020

Agradecimento

Primeiramente agradeço a Deus por tudo de bom que Ele faz na minha vida.

Aos meus pais, Rogério e Regina e meus irmãos, Vinicius e Sarah, que sempre me deram todo o suporte necessário.

Ao meu tio Dimas Pereira que me ajudou na obtenção dos dados utilizados no trabalho e esclarecimento de diversas dúvidas.

À minha Tia Ana Beatriz Goulart e meu primo Lucas Goulart pela ajuda na revisão do trabalho e artigo.

Ao professor Dr. Benedito Isaias Lima, da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), pela orientação, paciência e confiança durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro

E finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Num vai dar”.

- Craque Neto.

“Eu discordo Craque”

- Edilson Capetinha.

Resumo:

O monitoramento e manutenção dos transformadores de potência é de fundamental importância para o bom funcionamento do sistema elétrico e uma das variáveis importantes a ser monitorada é a temperatura. Neste trabalho foi feito uma estimativa da temperatura do topo do óleo e ponto quente do enrolamento utilizando lógica Fuzzy e comparada com o modelo IEEE C5791 para confirmar sua precisão.

Abstract

Monitoring and maintenance of power transformers are of crucial importance, ensuring stability and performance to the whole electric system, being its temperature one of the relevant variables to be monitored. In this paper we've estimated the maximum oil temperature and the coil hotspot applying fuzzy logic and verified its precision comparing to the IEE-C5791 model.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Representação transformador de potência

Figura 2.2: Representação autotransformador de potência

Figura 2.3: Circuito RLC equivalente transformador de potência

Figura 2.4: Circuito RLC equivalente autotransformador de potência

Figura 3.1: Sensor espiral de Bourdon

Figura 3.2: Visão térmica transformador de potência

Figura 3.3: Circuito térmico temperatura topo doo óleo

Figura 4.1: Processos térmicos lógica Fuzzy

Figura 4.2: Exemplo funções de pertinência

Figura 4.3: Método de defuzificação maior pertinência

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Associação circuitos térmicos e elétricos

Tabela 4.1: Exemplo variáveis linguísticas

Tabela 4.2: Grau de pertencimento variáveis linguísticas

Tabela 5.1: Dados técnicos autotransformador

Tabela 6.1: Funções de pertinência lógica Fuzzy

Tabela 6.2: Regras temperatura topo do óleo

Tabela 6.3: Regras temperatura ponto quente enrolamento

Tabela 7.1: Erros estimativa temperatura topo do óleo, em relação ao modelo lógica Fuzzy

Tabela 7.2: Erros estimativa temperatura ponto quente do enrolamento, em relação ao modelo lógica Fuzzy

Lista de Gráficos

Gráfico 5.1: Potência aparente autotransformador

Gráfico 5.2: Temperatura ambiente Itajaí-SC

Gráfico 6.1: Funções de pertinência temperatura ambiente, topo do óleo

Gráfico 6.2: Funções de pertinência carregamento, topo do óleo

Gráfico 6.3: Funções de pertinência temperatura topo do óleo

Gráfico 6.4: Mapeamento temperatura topo do óleo

Gráfico 6.5: Funções de pertinência temperatura ambiente, ponto quente enrolamento

Gráfico 6.6: Funções de pertinência carregamento, ponto quente enrolamento

Gráfico 6.7: Funções de pertinência temperatura ponto quente enrolamento

Gráfico 6.8: Mapeamento temperatura ponto quente enrolamento

Gráfico 7.1: Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente variável

Gráfico 7.2: Modelo lógica Fuzzy

Gráfico 7.3: Comparativo temperatura topo do óleo

Gráfico 7.4: Comparativo ponto quente enrolamento

Gráfico 7.5: Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente média diária

Gráfico 7.6: Temperatura topo do óleo, modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente média diária

Gráfico 7.7: Temperatura ponto quente enrolamento, modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente média diária

Gráfico 7.8: Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente máxima diária

Gráfico 7.9: Temperatura topo do óleo, modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente máxima diária

Gráfico 7.10: Temperatura ponto quente enrolamento, modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente máxima diária

Gráfico 7.11: Estimativas temperatura topo do óleo, dias 17 e 18

Gráfico 7.12: Estimativas temperatura topo do óleo, dias 19 e 20

Gráfico 7.13: Estimativas temperatura ponto quente enrolamento, dias 17 e 18

Gráfico 7.14: Estimativas temperatura ponto quente enrolamento, dias 19 e 20

Lista de abreviaturas de siglas

CEEE-GT – Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers

ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

ANSI – American National Standards Institute

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONAN – Óleo natural, ar natural

ONAF – Óleo natural, ar forçado

PT100 – sensores para medição de temperatura

RTD – Termoresistência

TCs – Transformadores de Corrente

IHM – Interface Homem Máquina

CARVAMB – Carregamento\Temperatura Ambiente

Lista de Variáveis

R – Relação de perdas sem carga e com carga

K e car2– Fator de carregamento (p.u)

θ_{oil} e oleo – Temperatura do topo do óleo

θ_{amb} e amb2– Temperatura ambiente

θ_e e enrol2– Temperatura ponto quente enrolamento

$\Delta\theta_{oil,nom}$ – Temperatura nominal do óleo acima da temperatura ambiente

$\Delta\theta_{e,nom}$ – Temperatura nominal do enrolamento acima da temperatura ambiente

$\Delta\theta_o$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente

$\Delta\theta_e$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente

$\Delta\theta_o(f)$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente final

$\Delta\theta_o(i)$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente inicial

$\Delta\theta_e(f)$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente final

$\Delta\theta_e(i)$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente inicial

$\Delta\theta_{o,r}$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente inicial nominal

$\Delta\theta_{e,r}$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente inicial nominal

Δt – Intervalo de tempo carregamento (minutos)

Ki – Carga inicial, por unidade

Ku – Carga final, por unidade

n – coeficiente do óleo transformador ONAN=0,8; ONAF=0,9

m – coeficiente do óleo transformador ONAN=0,8; ONAF=0,8

C – Constante térmica

τ_o – Constante de Tempo topo do óleo

τ_w – Constante de Tempo enrolamento

$P_{t,r}$ – Perdas totais nominal (w)

BB – Baixo Baixo

B – Baixo

MB – Médio Baixo

M – Médio

MA – Médio Alto

A – Alto

AA – Alto Alto

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1. Revisão bibliográfica	17
1.2. Organização do Trabalho.....	18
2. Transformador de Potencia	20
2.1. Funções do transformador	21
2.1.1. Transformadores Elevadores	21
2.1.2. Transformadores de Transmissão	21
2.1.3. Transformadores de Subtransmissão	21
2.1.4. Transformadores de Distribuição.....	21
2.2. Autotransformador.....	21
2.3. Circuitos Equivalentes.....	22
2.4. Falhas térmicas Transformadores de Potencia.....	23
2.4.1. Sobrecarga	23
2.4.2. Sobretenção	24
2.4.3. Umidade	24
2.4.4. Sistema de Isolação	24
2.4.5. Conexões e Comutadores	25
3. Comportamento Térmico Transformadores de Potencia	26
3.1. Medições Diretas	26
3.1.1. Sensor Espiral de Bourdon.....	26
3.1.2. Sensores Eletrônicos.....	27
3.1.3. Sensor Fibra Ótica.....	27
3.2. Medições indiretas	27
3.2.1. Termovisão.....	28
3.2.2. Modelo Swift	28
3.2.3. Modelo Susa.....	30
3.2.4. Norma IEEE C5791-2011	31
3.2.5. Métodos Computacionais	34
4. Logica Fuzzy.....	35
4.1. Conjuntos Fuzzy	36
4.2. Fuzzificação	37
4.2.1. Variáveis linguísticas	37
4.2.2. Funções de pertinência	38
4.3. Base de Regras	39

4.4.	Inferência	39
4.4.1.	Mamdani.....	39
4.4.2.	Takagi-Sugeno	40
4.5.	Defuzificação.....	41
4.5.1.	Método maior pertinência	41
4.5.2.	Método Centroide	42
4.5.3.	Método média da pertinência máxima	42
5.	Aquisição de Dados.....	44
5.1.	Dados Autotransformador	44
5.2.	Temperatura Ambiente.....	45
6.	Modelo lógica Fuzzy	46
6.1.	Temperatura Topo do Óleo	47
6.2.	Temperatura Ponto quente enrolamento.....	49
7.	Resultados.....	52
7.1.	Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente variável.....	52
7.2.	Modelo lógica Fuzzy.....	53
7.3.	Modelo IEEE com temperatura ambiente constante	54
7.3.1.	Temperatura ambiente média diária	55
7.3.2.	Temperatura ambiente máxima diária	56
8.	Conclusão.....	61
9.	Referências Bibliográficas	63

1. Introdução

O transformador de potência é um dos equipamentos mais caros do sistema elétrico. Nos anos 2000, o mercado de transformadores de distribuição no Brasil movimentou cerca de 350 milhões de dólares americanos por ano, crescendo a uma taxa de 6 a 8% ao ano, mesmo com uma crise econômica nos três anos anteriores [01].

Os custos de manutenção e reparos de transformadores de potência corresponderam a 18,28 %, 10,19 % e 8,27 % do preço médio de aquisição de um transformador novo (no mercado brasileiro) para equipamentos de 34,5 kV, 69 kV e 138 kV, respectivamente [02], por isso efetuar a manutenção regular deste equipamento evita falhas e desligamentos desnecessários, minimizando desligamentos forçados (não programados) que causam pesadas perdas de receitas aos agentes de transmissão.

Atualmente, no Brasil, há um grande número de equipamentos do sistema elétrico com idades avançadas. Pode-se afirmar com muita precisão que a idade média atual dos equipamentos instalados no parque elétrico se aproxima dos 30 anos, e que aproximadamente 65% dos equipamentos encontram-se com mais de 25 anos de uso [03].

Em 2017, utilizando como base de estudo 50 subestações da Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica - CEEE-GT, de um total de 219 transformadores de potência, 50 já se encontravam com uma idade maior que 35 anos e 13 com mais de 50 anos e dois transformadores já se encontravam com 62 anos em operação [04]

O uso de transformadores com mais de 30 anos não é uma exclusividade do Brasil. Na América do Norte, é calculado que para um parque total de 120.000 transformadores de Transmissão e Distribuição, aproximadamente 10% deste número são considerados críticos em termos de idade da unidade ou de sua condição, e também em termos de seu papel no sistema elétrico. Deste parque de equipamentos que já são considerados em estado crítico, é esperado monitorar somente 14% nos próximos cinco anos – 1,4% do total de transformadores [05].

Manutenções regulares nas plantas elétricas são de fundamental importância para o bom funcionamento do sistema elétrico. Segundo o relatório de estatística de desligamentos forçados de equipamentos do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), em 2018, do número total de desligamentos, 18,52% têm origem no comutador e 12,96% nos enrolamentos.

Essas falhas podem ser detectadas através do monitoramento de algumas grandezas. Para o comutador, é necessário que se avalie a vibração e temperatura; para os enrolamentos, são monitorados a concentração de gases dissolvidos no óleo, temperatura e descargas parciais. Daí a importância de acompanhar a temperatura como uma importante variável a ser monitorada, já que o aumento excessivo da temperatura dos enrolamentos pode causar o envelhecimento do papel isolante e conseqüentemente a diminuição da vida útil deste equipamento, como é mostrado na norma IEEE C57.91-2011 [06].

Transformadores novos são montados com vários tipos de sensores. Em relação aos sensores de temperatura do óleo, o mais comum é o sensor tipo Espiral de Bourdon [03].

Para a obtenção da temperatura do enrolamento, o método mais utilizado é a visão térmica. Para uma medição direta, é possível o uso de um sensor de fibra ótica, mas esse tipo de sensor deve ser instalado durante a fabricação do transformador, possui um custo elevado e apresenta dificuldades de manutenção, no caso de defeito [03].

No Brasil, esse tipo de sensor é pouco utilizado, visto que grande parte dos transformadores do sistema de energia elétrica do país estão obsoletos, por isso métodos indiretos são muito utilizados para estimar a temperatura dos enrolamentos.

1.1. Revisão bibliográfica

Na literatura científica, existem várias abordagens referentes a métodos para estimar a temperatura máxima do óleo e ponto quente do enrolamento, utilizando técnicas indiretas de medição, como em [07] onde a temperatura ambiente (°C), considerada constante ao longo do dia, e o fator de carregamento do transformador ($K=0.85$; $K=1$; $K=1.2$) foram utilizados para a estimação da temperatura do topo do óleo e posteriormente a temperatura do ponto quente do enrolamento, utilizando e

comparando entre si três modelos matemáticos, IEEE C57.91 (1995), modelos Swift e Susa.

Em [08], a temperatura do topo do óleo foi estimada utilizando técnicas inteligentes como redes neurais e Neuro-Fuzzy (ANFIS). Para o sistema com redes neurais, foi utilizado como entrada, a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e carregamento (MVA); para o modelo Neuro-Fuzzy, foi adicionado uma terceira entrada, temperatura do fundo do óleo, após realizar a estimativa do topo do óleo, e os resultados foram comparados com o modelo convencional ANSI/IEEE.

Em [09], foi realizado um estudo onde técnicas computacionais como Fuzzy, Redes Neurais e Neuro-Fuzzy são usadas para prever a temperatura do enrolamento de um transformador de distribuição instalado em um ambiente poluído por harmônicos, que podem gerar um aumento da temperatura do enrolamento, comprometendo o desempenho e vida útil do equipamento.

1.2. Organização do Trabalho

Alterações em várias grandezas podem influenciar a temperatura do transformador, como a ventilação, carregamento, temperatura ambiente, umidade e pressão. No presente trabalho, o estudo utilizou como entradas o carregamento (MVA) de um autotransformador monofásico e a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), para a estimação da temperatura do topo do óleo e ponto quente do enrolamento, utilizando a lógica Fuzzy e posteriormente realizando uma comparação com modelo convencional IEEE-C5791, para confirmar sua eficácia.

O presente trabalho foi dividido em nove capítulos, o primeiro mostra a situação atual do parque elétrico brasileiro e a importância do monitoramento da temperatura nos transformadores de potência, principalmente em transformadores com muitos anos de operação.

O segundo capítulo faz a revisão bibliográfica sobre o transformador de potência e suas funções no sistema elétrico, mostrando também os tipos de falhas que podem acontecer e gerar distúrbios térmicos no transformador.

No terceiro capítulo é abordado o comportamento térmico do transformador de potência, mostrando os tipos de medições e estimativas que podem ser utilizadas

para o monitoramento das temperaturas do óleo e enrolamentos do transformador de potência.

O quarto capítulo apresenta a revisão bibliográfica da Lógica Fuzzy, técnica utilizada para a estimação das temperaturas internas do transformador de potência.

No quinto capítulo são expostos os dados técnicos e operacionais do autotransformador, juntamente com os valores de temperatura ambiente utilizados nas estimativas das temperaturas do óleo e enrolamento.

O capítulo seis mostra o desenvolvimento da lógica Fuzzy, criação das variáveis linguísticas, funções de pertinência, regras e mapeamento do sistema térmico do topo do óleo e ponto quente do enrolamento.

No capítulo sete será apresentada a análise dos resultados obtidos, mostrando a eficácia do modelo desenvolvido e realizando uma comparação com três variações do modelo IEEE C57.91-2011, com relação ao uso da temperatura ambiente.

O capítulo oito apresenta as conclusões, discussões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o último capítulo mostra as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

2. Transformador de Potência

Transformador de potência é um equipamento de suma importância para o sistema elétrico, ele tem a função principal de adequar e transmitir uma potência elétrica de um sistema elétrico para outro.

O funcionamento do transformador se resume na aplicação de uma tensão alternada no enrolamento primário (V_1), fazendo com que seja criada uma corrente alternada nesse enrolamento (I_1), que por sua vez cria um fluxo magnético alternado (Φ_m) que circula pelo núcleo do transformador induzindo uma corrente alternada no enrolamento secundário (I_2) e conseqüentemente uma tensão alternada na saída do transformador (V_2). A relação de transformação entre as tensões dos enrolamentos primários e secundários é igual a relação entre o número de espiras dos enrolamentos. Como é possível ver em (01).

$$R = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (01)$$

Ao conectar-se uma carga ao secundário de um transformador, a corrente I_2 provocará quedas de tensões nos enrolamentos primário e secundário, nessas condições a relação de transformação do transformador é dada da seguinte forma (02) [10]:

$$R = \frac{V_1}{V_2} \quad (02)$$

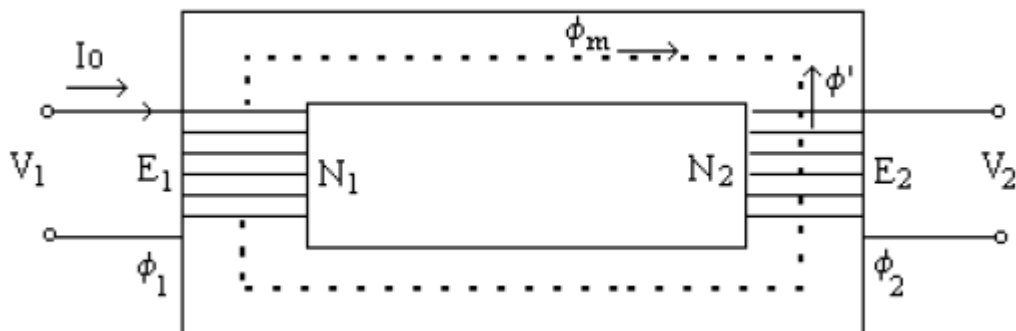


Figura 2.1: Representação de um Transformador [10]

2.1. Funções do transformador

Os transformadores podem atuar em diferentes funções no sistema elétrico, possuindo características específicas dependendo da função realizada, podendo trabalhar como Transformadores Elevadores, de Transmissão, de Subtransmissão e de Distribuição [11].

2.1.1. Transformadores Elevadores

São Transformadores que elevam os níveis de tensão, muito utilizados na geração de energia, elevando a tensão produzida pelos geradores. Possui níveis de tensão no enrolamento primário até 20KV e secundário 550KV.

2.1.2. Transformadores de Transmissão

Transformadores utilizados em subestações, mais especificamente para interligar linhas e sistemas com diferentes níveis de tensão. Trabalha normalmente com tensão primária até 765KV, secundário com 550KV e terciário com 13,8 ou 69KV.

2.1.3. Transformadores de Subtransmissão

Transformadores que abaixam os níveis de tensão das linhas de transmissão para alimentar os sistemas de distribuição. Geralmente trabalham com tensões até 138kV no enrolamento primário, até 34,5kV no secundário e 13,8 ou 6,9 no terciário.

2.1.4. Transformadores de Distribuição

Transformadores pequenos utilizados para rebaixar os níveis de tensão recebidos das linhas de distribuição para alimentação dos consumidores finais. No sistema elétrico trabalham com tensão primária até 34,5kV e 440V no enrolamento secundário.

2.2. Autotransformador

O autotransformador é um tipo de transformador onde os enrolamentos primários e secundários são conectados em série, por possuir uma configuração diferente do transformador convencional, o autotransformador transporta uma parte da potência condutivamente e o restante de forma eletromagnética [10].

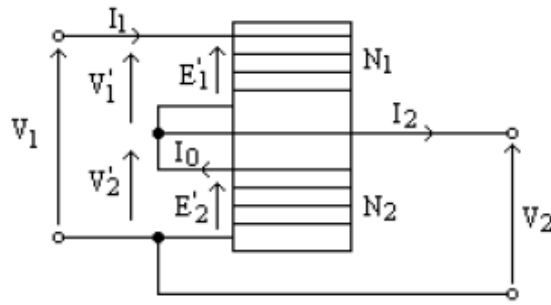


Figura 2.2: Representação de um Autotransformador [10]

Em comparação com o transformador, o autotransformador tem uma série de vantagens como corrente de excitação menor, melhor regulação, maior rendimento, menor custo [10], entretanto possui uma desvantagem: a ausência de isolamento elétrico.

2.3. Circuitos Equivalentes

Para fins de cálculos e simulações o transformador e autotransformador podem ser representado de várias formas, a mais comum é um circuito RLC como mostrado nas figuras 2.3 e 2.4, respectivamente.

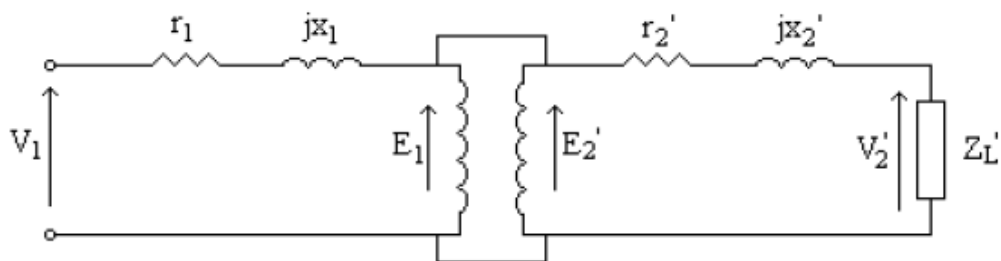


Figura 2.3: Circuito RLC Transformador [10]

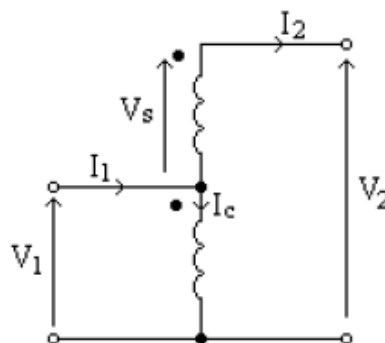


Figura 2.4: Circuito RLC Autotransformador [10]

2.4. Falhas térmicas nos Transformadores de Potência

O desligamento forçado se caracteriza pelo ato de retirada de serviço de um componente, em condições não programadas, resultante de falha ou de desligamento de emergência. O desligamento forçado impõe que o equipamento seja desligado automaticamente ou manualmente para evitar riscos à integridade física de pessoas ou do meio ambiente, danos ao equipamento e/ou outras consequências ao sistema elétrico [12].

Foi feito um estudo, o “*An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service*” [13], baseado nos registros de falhas de mais de 1000 transformadores de potência, com níveis de tensão entre 72KV e 700KV, com idade inferior a 20 anos, nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de 13 países entre 1968 e 1978.

Esse estudo faz uma análise estatística das falhas nos transformadores de potência que causaram parada não programável. Em relação à natureza das falhas dos transformadores, cerca de 11% são de natureza térmica. Em relação ao local das falhas nos transformadores de potência, cerca de 33% ocorrem nos enrolamentos e 13,5% estão localizadas no óleo ou tanque.

Bartley (2003) [14] realizou um levantamento com os principais efeitos e influências que levam o transformador à falha. A seguir serão observadas as falhas onde a temperatura do transformador é causa ou efeito:

2.4.1. Sobrecarga

A sobrecarga em um transformador acontece quando uma carga de potência é alimentada acima da sua capacidade nominal, a prática de sobrecarregamento em transformadores de distribuição é muito comum, não apenas no Brasil, e permitida pelas normas técnicas como um mecanismo de maximização do retorno de capital [15].

Mesmo sendo uma prática usual, gera danos ao transformador, a principal alteração é no aumento de temperatura, que conseqüentemente aumenta a pressão interna, gerando expansão no óleo, evolução de gases dissolvidos no óleo, além da expansão térmica de condutores, partes estruturais e materiais isolantes que podem causar deformações permanentes, diminuindo a vida útil do transformador. Grande

parte dos projetos incluem sistemas de ventilação forçada, com o objetivo de reduzir a temperatura e minimizar os efeitos da sobrecarga.

2.4.2. Sobretensão

Segundo o IEEE [16], sobretensões são variações de tensão acima de 1,1 pu com duração acima de um minuto. Danos por sobretensão em transformadores podem estar associados ao aumento da solitação dielétrica dos materiais isolantes, quanto ao aumento generalizado da temperatura.

Sobretensões podem ser de dois tipos:

- Curta duração: Difíceis de serem detectadas por serem muito rápidas, podem causar interrupção de arco elétrico interno ao transformador.
- Longa duração: Se manifestam pelo aumento de temperatura do transformador

As sobretensões de curta e longa duração podem ser subdivididas em:

- Sobretensões Temporárias
- Sobretensões de Manobra
- Sobretensões Transitórias Muito Rápidas
- Sobretensões de Descargas Atmosféricas

2.4.3. Umidade

A umidade nos transformadores de potência ocorre principalmente pela falta de manutenção, geralmente é oriunda de falhas nos anéis de vedação ou orifícios causados pela corrosão.

Acelerando o processo de envelhecimento, devido ao aumento de condutividade e da probabilidade de formação de bolhas, reduzindo a estabilidade térmica do sistema de isolamento, principalmente em situações de sobrecarga [17].

2.4.4. Sistema de Isolação

Os principais guias que definem os parâmetros de funcionamento dos transformadores de potência (IEC, ANSI e IEEE) consideram que o principal fator responsável pelo fim da vida útil dos transformadores está relacionado ao fator térmico

dos mesmos. Os sistemas de isolamento nos transformadores são constituídos por dois componentes principais: celulose e óleo [18].

A falha no sistema de isolamento é uma das principais causas de falhas no transformador, pois várias alterações no transformador influenciam a perda de vida útil do papel isolante, principalmente temperatura, umidade e oxigênio.

De forma geral, entre 90% e 95% da isolação sólida dos transformadores são influenciadas pela temperatura do óleo. De 5% a 10% de celulose encontram-se nas proximidades dos condutores de corrente elétrica que operam na faixa de 10°C a 20°C acima da temperatura do óleo do transformador em operação e uma pequena porcentagem de celulose opera em temperaturas superiores a 30°C acima da temperatura do óleo [18].

O sistema de isolamento é fator determinante da vida útil do equipamento, uma vez que, diferente do óleo, que pode ser tratado, regenerado ou substituído, a sua troca implica na desmontagem do transformador e intervenção nos enrolamentos que envolvem a parte ativa [11].

Existem métodos químicos e elétricos para diagnosticar a condição do sistema de isolação, como [15]:

- Análise da umidade
- Análise dos gases dissolvidos no óleo, produzidos pela degradação da celulose e do óleo
- Medição do grau de polarização do papel isolante

2.4.5. Conexões e Comutadores

O transformador é formado por um conjunto de subsistemas que fazem com que o mesmo opere de forma confiável e eficiente, ele pode ser dividido entre parte ativa, que corresponde ao núcleo e enrolamentos, o restante faz parte do grupo chamado de acessórios, como as conexões e comutadores.

Falhas nesses elementos podem causar inúmeros danos ao sistema, esse tipo de falha se caracteriza, principalmente, por um aumento de temperatura localizada, muito pelo mal funcionamento dos contatos. A termografia ou visão térmica é muito utilizada para verificar esse tipo de falha.

3. Comportamento Térmico Transformadores de Potência

Conforme dito anteriormente, inúmeras variáveis influenciam a variação da temperatura interna dos transformadores, tanto do óleo como do enrolamento. E existem vários métodos para obtenção dessas temperaturas, podendo ser divididos em dois tipos de medições, direta e indireta.

3.1. Medições Diretas

As medições diretas são aquelas cujo resultado é obtido diretamente, são representadas por sensores, que são instalados em determinados pontos do transformador, a fim de extrair a medida de temperatura mais próxima da real.

No caso dos transformadores de potência as medidas de temperatura que necessitam de monitoramento são a temperatura do topo do óleo e do ponto quente do enrolamento. Para o topo do óleo, o sensor mais utilizado é o espiral de Bourdon e para o ponto quente do enrolamento é utilizado um sensor de fibra óptica.

3.1.1. Sensor Espiral de Bourdon

A espiral de Bourdon é um sensor manométrico, que consiste em um tubo espiral que se “deforma” com o aumento da pressão, voltando ao normal quando a pressão se regulariza.

No caso dos transformadores, o aumento da temperatura do óleo isolante faz com que ocorra um aumento na pressão na espiral de Bourdon. O mecanismo (Espiral de Bourdon ou Fole) é acoplado a ponteiros, sendo um de arraste (ponteiro vermelho) que indica a temperatura máxima alcançada pelo óleo e o outro que indica a temperatura instantânea do óleo (ponteiro branco) [03].

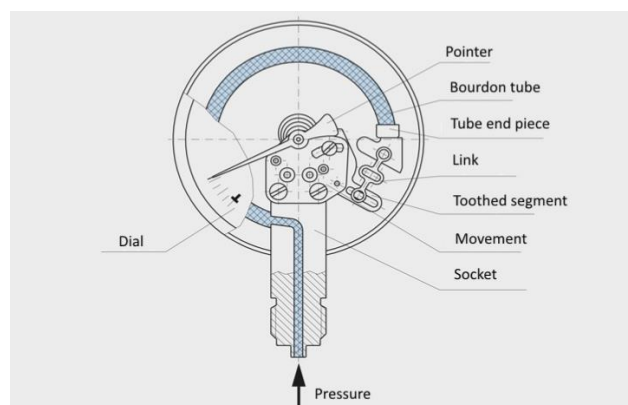


Figura 3.1: Espiral de Bourdon [19].

3.1.2. Sensores Eletrônicos

Além da espiral de Bourdon, é possível a utilização de indicadores eletrônicos de temperatura, constituídos de PT100 (RTD) instalado no topo do transformador, com medição de corrente a partir de TCs de bucha e um indicador micro-processado (IHM). O processamento das informações obtidas a partir do PT100 e TCs fornece tanto a temperatura do óleo do transformador quanto a temperatura do ponto mais quente do enrolamento do transformador (imagem térmica). O valor da temperatura do enrolamento é obtido através de algoritmos processados no indicador eletrônico [03].

O uso de sensores eletrônicos possui vantagens em relação ao sensor eletromecânico, pois não necessitam calibração para garantir a precisão nas leituras e suas medidas são acessíveis eletronicamente.

3.1.3. Sensor Fibra Ótica

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento, pode ser obtida através de sensores de fibra ótica instaladas diretamente no enrolamento do transformador, realizando uma medida com grande precisão.

Desvantagens do sensor de fibra ótica:

- Somente pode ser instalado durante a fabricação
- Necessária a parada total do transformador para realização de reparos
- Alto custo

3.2. Medições indiretas

Medição indireta é aquela cujo resultado é obtido através de medições de outras grandezas, ligadas por uma dependência conhecida com a grandeza procurada. São utilizadas quando é difícil medir diretamente a grandeza procurada, ou quando a medição indireta produz resultados mais precisos [20].

As medições indiretas de temperatura são comumente utilizadas para medir a temperatura do enrolamento do transformador, por ser um local de difícil acesso, existindo vários métodos e algoritmos capazes de realizar tal estimação.

3.2.1. Termovisão

Também conhecida como termografia ou visão térmica, essa técnica utiliza-se de câmeras que captam as radiações infravermelhas emitidas pelo transformador, detectando e quantificando o calor nos equipamentos.

A grande vantagem da termovisão é a capacidade de analisar, sem necessidade de contato direto, várias áreas do transformador como tanque, enrolamentos e comutadores, sendo uma importante técnica preditiva.

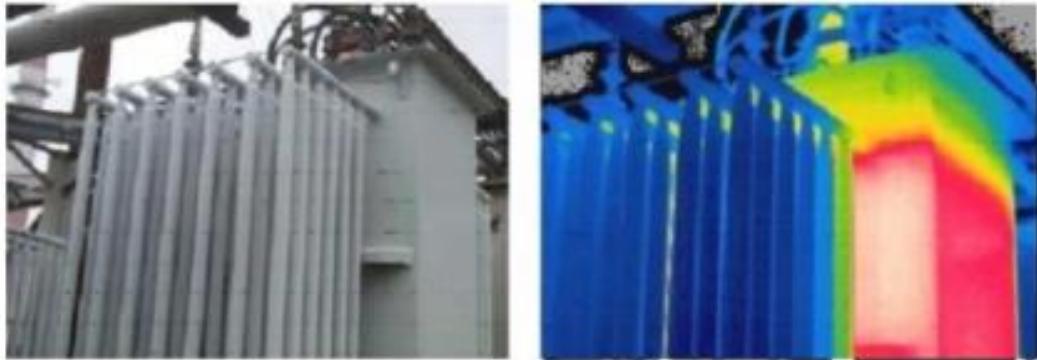


Figura 3.2: Visão térmica transformador de potência [21].

3.2.2. Modelo Swift

O modelo Swift [22] é uma alternativa à norma IEEE C57.91, abordando conceitos que não são utilizados no modelo IEEE, como a transferência de calor. Para a criação deste modelo, foi utilizada uma analogia entre os circuitos térmicos e elétricos, como mostrado na tabela 3.1.

Circuito Térmico		Circuito Elétrico	
Calor Gerado	q	Corrente	i
Temperatura	θ	Tensão	u
Resistencia Térmica	R _{th}	Resistencia Elétrica	R _{el}
Capacitância Térmica	C _{th}	Capacitância Elétrica	C _e

Tabela 3.1: Associação circuitos térmicos e elétricos

As equações em (03) mostram as leis que regem o circuito elétrico, já as equações em (04) expressam a lei térmica correspondente.

$$u = R_{el} \cdot i \quad e \quad i = C_{el} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (03)$$

$$\theta = R_{th} \cdot q \quad e \quad q = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (04)$$

A figura 3.3 mostra o circuito térmico equivalente do topo do óleo.

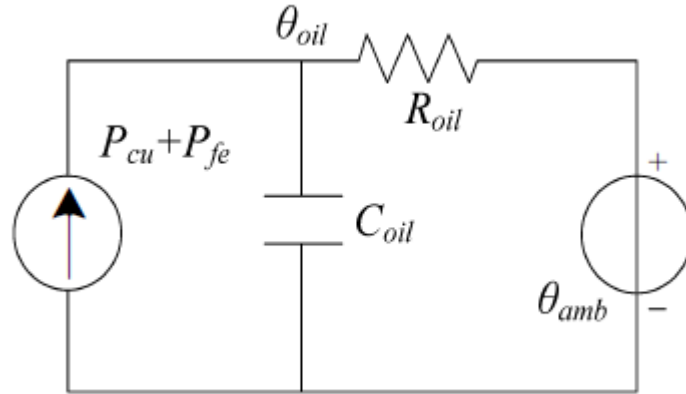


Figura 3.3: Circuito térmico topo do óleo [07].

Com a manipulação das formulas anteriores, é possível expressar a temperatura do topo do óleo através da equação (05).

$$\frac{1 + R \cdot K^2}{1 + R} (\Delta\theta_{oil,nom})^{1/n} = \tau_{oil,nom} \frac{d\theta_{oil}}{dt} + (\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1/n} \quad (05)$$

Sendo:

R – Relação de perdas sem carga e com carga

K – Fator de carregamento (p.u)

$\Delta\theta_{oil,nom}$ – Temperatura nominal do óleo acima da temperatura ambiente

θ_{oil} – Temperatura do topo do óleo

θ_{amb} – Temperatura ambiente

$\tau_{oil,nom}$ – Constante de tempo do óleo

n – Coeficiente do óleo

As equações referentes ao ponto quente do enrolamento, são completamente análogos aos do modelo de temperatura do óleo [22], sendo representadas pela equação (06).

$$K^2(\Delta\theta_{e,nom})^{1/m} = \tau_{e,nom} \frac{d\theta_e}{dt} + (\theta_e - \theta_{oil})^{1/m} \quad (06)$$

Onde:

$\Delta\theta_{e,nom}$ – Temperatura nominal do enrolamento acima da temperatura ambiente

θ_e – Temperatura ponto quente enrolamento

$\tau_{e,nom}$ – Constante de tempo enrolamento

m – Coeficiente do enrolamento

3.2.3. Modelo Susa

Em [23], foi proposto uma nova abordagem para medição das temperaturas no transformador de potência. O método apresentado neste artigo é uma modificação do modelo Swift, sendo a grande diferença a introdução de uma resistência térmica não linear, que leva em consideração alterações nas características térmicas do óleo do transformador com a temperatura.

O calor gerado por perdas no transformador com carga e sem carga é representado por duas fontes de calor ideais. A temperatura ambiente é representada como uma fonte de temperatura ideal. A resistência térmica não linear do óleo de acordo com a teoria da transferência de calor é dada pela equação (07):

$$R_{th-oil} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (07)$$

Sendo:

R_{th-oil} – Resistencia não linear do óleo

h – Coeficiente de transferência de calor

A – Área

A equação (08), expressa a temperatura do topo do óleo do transformador

$$\frac{1 + R \cdot K^2}{1 + R} u_{pu}^n \Delta\theta_{oil,nom} = u_{pu}^n \tau_{oil,nom} \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})^{n+1}}{\Delta\theta_{oil,nom}^n} \quad (08)$$

Sendo:

R – Relação de perdas sem carga e com carga

K – Fator de carregamento

$\Delta\theta_{oil,nom}$ – Temperatura nominal do óleo acima da temperatura ambiente

θ_{oil} – Temperatura do topo do óleo

θ_{amb} – Temperatura ambiente

$\tau_{oil,nom}$ – Constante de tempo do óleo

u_{pu} – Viscosidade cinemática do óleo

n – Coeficiente do óleo

A equação que modela a temperatura do ponto quente do enrolamento é dada em (09):

$$(K^2 P_{e,pu}) u_{pu}^n \Delta\theta_{e,nom} = u_{pu}^n \tau_{e,nom} \frac{d\theta_e}{dt} + \frac{(\theta_e - \theta_{oil})^{n+1}}{\Delta\theta_{e,nom}^n} \quad (09)$$

Sendo:

$P_{e,pu}$ – Relação de perdas

$\Delta\theta_{e,nom}$ – Temperatura nominal do enrolamento acima da temperatura ambiente

θ_e – Temperatura ponto quente enrolamento

$\tau_{e,nom}$ – Constante de tempo enrolamento

3.2.4. Norma IEEE C5791-2011

Existem inúmeras métricas que norteiam a medição da temperatura dos transformadores. A fim de padronizar um método confiável, que modele a temperatura do transformador de forma precisa, o IEEE desenvolveu em 1981 a norma C57.91 (IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators), tendo sua última revisão em 2011, se tornou a principal métrica utilizada para estimar a temperatura máxima do óleo, ponto quente do enrolamento e a perda de vida útil do transformador.

O cálculo da temperatura do enrolamento é feito em duas partes; primeiramente é calculada a temperatura do topo do óleo e depois é calculada a

temperatura do enrolamento, utilizando como entradas, o carregamento do transformador e a temperatura ambiente média.

O modelo IEEE sugere que para a temperatura ambiente, deve ser utilizada a média diária para o mês envolvido, com a média de vários anos ou a média das temperaturas diárias máximas do mês envolvido de vários anos [06].

A temperatura do enrolamento é obtida através da equação (10):

$$\theta_e = \theta_{amb} + \Delta\theta_o + \Delta\theta_e \quad (10)$$

Sendo:

θ_e – Temperatura do enrolamento

θ_{amb} – Temperatura Ambiente

$\Delta\theta_o$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente

$\Delta\theta_e$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente

O cálculo elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente é dado pela equação (11):

$$\Delta\theta_o = [\Delta\theta_o(f) - \Delta\theta_o(i)] \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\delta\theta\tau_o}}\right) + \Delta\theta_o(i) \quad (11)$$

Onde:

$\Delta\theta_o(f)$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente final

$\Delta\theta_o(i)$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente inicial

Δt – Intervalo de tempo carregamento (minutos)

τ_o – Constante de Tempo topo do óleo

A temperatura inicial e final da elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente é dada na equação (12) e (13), respectivamente:

$$\Delta\theta_o(i) = \Delta\theta_{o,r} \left(\frac{Ki^2R + 1}{R + 1}\right)^n \quad (12)$$

$$\Delta\theta_o(i) = \Delta\theta_{o,r} \left(\frac{Kf^2R + 1}{R + 1}\right)^n \quad (13)$$

Sendo:

$\Delta\theta_{o,r}$ – Elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente inicial nominal

K_i – Carga inicial, por unidade

K_u – Carga final, por unidade

R – Relação de perdas com carga e perdas a vazio

n – coeficiente do óleo transformador ONAN=0,8; ONAF=0,9

A constante de tempo do óleo (τ_o) e a constante de tempo do óleo nominal ($\tau_{o,r}$) são calculadas através das equações (14) e (15), respectivamente:

$$\tau_o = \tau_{o,r} \left(\frac{\frac{\Delta\theta_{o,f}}{\Delta\theta_{o,r}} - \frac{\Delta\theta_{o,i}}{\Delta\theta_{o,r}}}{\left(\frac{\Delta\theta_{o,f}}{\Delta\theta_{o,r}}\right)^{1/n} - \left(\frac{\Delta\theta_{o,i}}{\Delta\theta_{o,r}}\right)^{1/n}} \right) \quad (14)$$

$$\tau_{o,r} = \frac{C\Delta\theta_{o,r}}{P_{t,r}} \quad (15)$$

Onde:

C – Constante térmica

$P_{t,r}$ – Perdas totais nominal (w)

A constante térmica do óleo é calculada através das formulas (16) para ONAN e (17) para ONAF:

$$C = 0,1323*(\text{Peso núcleo Kg}) + 0,0882*(\text{Peso tanque Kg}) + 0,3513*(\text{Litros óleo}) \quad (16)$$

$$C = 0,1323*(\text{Peso núcleo Kg}) + 0,1323*(\text{Peso tanque Kg}) + 0,5099*(\text{Litros óleo}) \quad (17)$$

Após o cálculo da elevação da temperatura do óleo sobre a temperatura ambiente, a elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente é calculada através da formula (18).

$$\Delta\theta e = [\Delta\theta e(f) - \Delta\theta e(i)] \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{60\tau w}}\right) + \Delta\theta e(i) \quad (18)$$

$\Delta\theta e(f)$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente final

$\Delta\theta e(i)$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente inicial

Δt – Intervalo de tempo carregamento (minutos)

τw – Constante de Tempo enrolamento

A temperatura inicial e final da elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente é dada nas equações (19) e (20), respectivamente:

$$\Delta\theta e(i) = \Delta\theta o, rKi^{2m} \quad (19)$$

$$\Delta\theta e(f) = \Delta\theta o, rKf^{2m} \quad (20)$$

Sendo:

$\Delta\theta e, r$ – Elevação da temperatura do enrolamento sobre a temperatura ambiente inicial nominal

m – Coeficiente do óleo transformador ONAN=0,8; ONAF=0,8

3.2.5. Métodos Computacionais

Além dos métodos citados anteriormente, existe a possibilidade de realizar a modelagem da temperatura do transformador utilizando ferramentas computacionais, como técnicas inteligentes como redes neurais, logica Fuzzy e neuro-Fuzzy.

Esses tipos de técnicas são comuns em sistemas caixa preta, muito utilizadas no reconhecimento de padrões, análises estatísticas. No caso da estimativa da temperatura do transformador, é utilizada a análise de dados antigos, como temperatura ambiente, carregamento, umidade, temperatura do óleo e enrolamentos, de forma que seja possível identificar um padrão e desenvolver a lógica necessária para estimar a temperatura.

4. Logica Fuzzy

A lógica Fuzzy também conhecida como lógica difusa ou nebulosa, ficou conhecida pelas primeiras vezes por Zadeh (1965) e Goguen (1967,1969), onde foi abordado o problema das imprecisões que acontecem em vários tipos de sistemas e aplicações. Mais recentemente, esses conceitos têm sido amplamente abordados em várias áreas e aplicações, como controle de fluxo de caixa, análise de risco, controle de estoques, avaliações, controle de qualidade entre outros, ganhando maior espaço, atualmente, em otimizações e automação industrial, devido sua facilidade de retratar a lógica da racionalidade humana [24].

Mesmo com o crescimento da utilização da lógica difusa, a maioria das aplicações descritas anteriormente podem ser executadas com uso das lógicas clássicas, matemáticas, que são incontestáveis para fins de modelagem, mas existem limites para sua utilização, principalmente em sistemas com grande grau de incertezas, que são difíceis de serem mensurados. Já a lógica Fuzzy é uma lógica não convencional, não binária, onde um estado pode ser mais que somente verdadeiro ou falso, sendo capaz de criar um modelo mais preciso, representando exatamente nossa percepção do fenômeno modelado [25].

Zimmermann mostra em seu livro [25] os principais objetivos da lógica Fuzzy, que vão além da modelagem de incertezas, como mostrado abaixo:

- Incertezas: A modelagem de incertezas é certamente o objetivo mais conhecido e mais antigo, e no entendimento de muitas pessoas é o principal e único objetivo da lógica Fuzzy.
- Relaxamento: Modelos e métodos clássicos fazem distinção entre viável e inviável, pertencente a um cluster ou não, ótimo ou subótimo, etc. Muitas vezes, essa visão não captura a realidade adequadamente. A teoria dos conjuntos nebulosos tem sido amplamente utilizada para relaxar ou generalizar os métodos clássicos, de um caráter dicotômico a gradual.
- Compactação: Devido à capacidade limitada da memória humana de curto prazo ou de sistemas técnicos, muitas vezes não é possível armazenar todos os dados relevantes ou apresentar massas de dados a um observador humano de tal maneira que ele possa perceber as informações contidas nesses dados. A Lógica Fuzzy tem sido usada para reduzir a complexidade dos dados em um

grau aceitável, geralmente através de variáveis linguísticas ou via análise de dados difusos (agrupamento difuso etc.).

Para a criação da lógica Fuzzy, o projetista utiliza os conhecimentos humanos adquiridos da prática para criar um conjunto de regras que seja fiel ao sistema real, a lógica Fuzzy pode ser dividida em cinco partes:

- Conjuntos Fuzzy
- Fuzzificação
- Base de Regras
- Inferência
- Defuzzificação

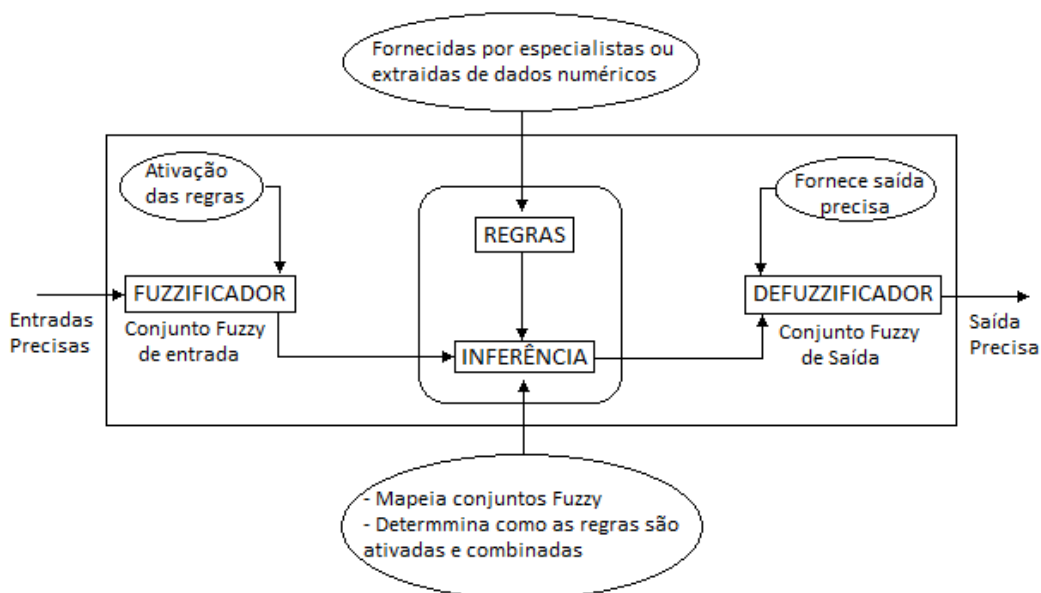


Figura 4.1: Processos internos lógica Fuzzy

4.1. Conjuntos Fuzzy

Na teoria dos conjuntos clássica (determinística), em um conjunto A, pertencente a um universo X, cada elemento de X pode ou não pertencer ao conjunto A. Sendo assim a função característica pode ser expressada por (21):

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (21)$$

Para um conjunto difuso, a função característica permite vários graus de associação para os elementos de um determinado conjunto, em um universo X com valores no intervalo $[0,1]$, $\mu_A(x)$ representa a função de pertinência do elemento x ao conjunto Fuzzy A , desse modo um conjunto Fuzzy é expresso por (22):

$$A = \{(x, \mu_A(x))/x \in X\} \quad (22)$$

4.2. Fuzzificação

A fuzzificação é a parte da lógica Fuzzy que recebe e processa as entradas do sistema, aparecendo no sistema na forma de números reais, que posteriormente são convertidos em variáveis linguísticas. Após este processo são criadas as funções de pertinência.

4.2.1. Variáveis linguísticas

Como dito anteriormente, a lógica Fuzzy realiza a modelagem de uma aplicação utilizando o conhecimento prático humano, uma forma de generalizar o sistema e aproximar o modelo segundo a ótica do projetista.

Como por exemplo a variável “Temperatura Ambiente”, que ao invés de ser expressa em intervalos de números reais, será representada por variáveis linguísticas, como mostra a tabela abaixo:

TEMPERATURA (°C)	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS
ABAIXO DE 20°C	Temperatura Baixa
20 ATÉ 30°C	Temperatura Média
ACIMA DE 30°C	Temperatura Alta

Tabela 4.1: Exemplo Variáveis linguísticas

A modelagem depende diretamente do projetista, pois cada pessoa tem seu ponto de vista do sistema observado. No caso da temperatura ambiente, no deserto, a temperatura ambiente pode atingir 50°C, pode-se dizer então que 30°C é considerado uma temperatura ambiente “média”, já pra uma pessoa que vive em regiões frias a mesma temperatura de 30°C representa uma temperatura ambiente “alta”.

Uma variável linguística é normalmente representada pela quintupla $[N, T(N), X, G, M]$, onde [27]:

- N: nome da variável (Temperatura ambiente);
- T(N): Conjunto das variáveis linguísticas: {baixa, média, alta};
- X: Universo discutido (15 a 35°C);
- G: Valor real é representado pela composição das variáveis linguísticas (temperatura ambiente baixa e média);
- M: Associa o valor anterior (G) a um conjunto Fuzzy cuja função de pertinência exprime o significado.

4.2.2. Funções de pertinência

Sendo a lógica Fuzzy uma lógica não binária, o mesmo elemento pode pertencer a mais de um conjunto, a função de pertinência expressa o grau de pertencimento de um elemento à um conjunto, variando entre zero e um, sendo que “zero” representa completa exclusão e “um” representa completa pertinência.

As funções de pertinência mais utilizadas são as de forma triangular, trapezoidal ou gaussiana. É mostrado, respectivamente, na figura 4.2 e tabela 4.2, as funções de pertinência e grau de pertencimento para o exemplo da temperatura ambiente.

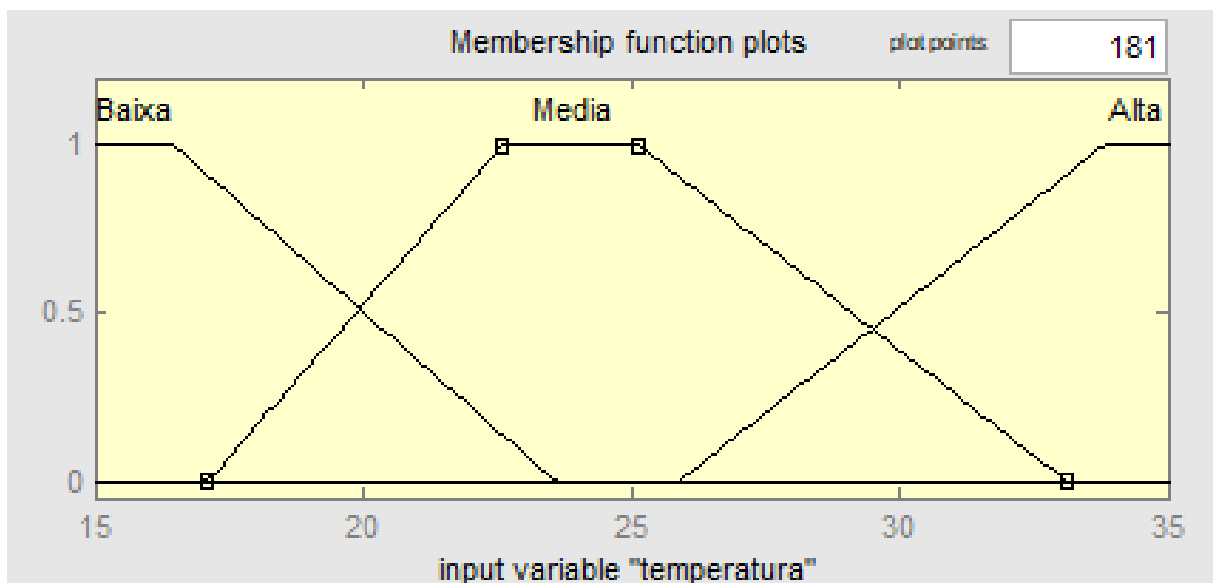


Figura 4.2: Funções de Pertinência

TEMPERATURA	BAIXA	MÉDIA	ALTA
15 °C	1	0	0
20 °C	0,5	0,5	0
25 °C	0	1	0
28 °C	0	0,6	0,4
35 °C	0	0	1

Tabela 4.2: Grau de pertencimento variáveis linguísticas

4.3. Base de Regras

A base de regras é a forma que o projetista expressa de maneira organizada os conhecimentos adquiridos que regem o funcionamento do sistema modelado, as regras geralmente estão no formato if-then (se-então), formando uma expressão do tipo: se x é A então y é B . O sistema Fuzzy também é capaz de processar várias entradas e saídas, neste caso o formato das regras pode ser do tipo: se (x é A) e/ou (y é B) então (z é C).

Para desenvolver a base de regras é necessário o profundo conhecimento do sistema modelado, que pode ser extraído da vivência de um especialista ou através da análise dos dados coletados. Para um sistema de alta complexidade ou quando não há a possibilidade da utilização do conhecimento prático, é possível que a base de regras do Fuzzy seja criada através de técnicas de redes neurais, também conhecida como neuro-Fuzzy.

4.4. Inferência

O sistema de inferência é a etapa que recebe e processa os dados do sistema, recebendo os dados de entrada já fuzzificados junto com o conhecimento na base de regras, que resulta na saída Fuzzy. Dentre os métodos de inferência, os dois mais comuns são o Mamdani e Takagi-Sugeno-Kang (TKS).

4.4.1. Mamdani

A ideia principal da inferência Mamdani é descrever os estados do processo por meio de variáveis linguísticas, usando essas variáveis como entradas para regras de controle. A variável de entrada pode ser medida, derivada de um sinal medido ou uma variável de saída do controlador.

Os termos das variáveis linguísticas são conjuntos difusos com uma determinada forma. É comum usar conjuntos difusos trapezoidais ou triangulares devido à eficiência computacional, mas outras formas são possíveis [25].

Formalmente, descrevemos os termos de cada variável linguística por suas funções de pertinência $\mu_{i,j}(x)$, onde “i” indica a variável linguística e “j” indica o termo da variável linguística “i”. O número de variáveis linguísticas e o número de termos de cada variável linguística determinam o número de regras possíveis. Na maioria das aplicações, certos estados podem ser negligenciados porque são impossíveis ou porque uma ação de controle não seria útil. Portanto, é suficiente escrever regras que cobrem apenas partes do espaço de estado. Entretanto, caso nenhuma regra seja acionada é preciso definir um valor padrão de saída do controlador.

Segundo Zimmerman [25], o núcleo computacional pode ser descrito como um processo que consiste em três etapas:

A primeira etapa é calcular os graus de associação dos valores de entrada nos antecedentes da regra. Empregando o operador mínimo como modelo para o “e”, calculamos o grau de correspondência da regra “r” como em (23):

$$\alpha_r = \min_{i=1,\dots,n} \{\mu_i^{j_i}(x_i^{entrada})\} \quad (23)$$

Na sequência é realizado o cálculo das consequências de cada regra, através da formula (24):

$$\mu_r^{conseq}(u) = \min\{\alpha_r, \mu^j(u)\} \quad (24)$$

Após o cálculo das consequências de cada regra é realizado a agregação de todas as consequências usando o operador máximo. Como mostrado na equação (25):

$$\mu^{conseq}(u) = \max_r \{\mu_r^{conseq}(u)\} \quad (25)$$

4.4.2. Takagi-Sugeno

Em 1985 foi proposto por Sugeno e Nishida um novo método de inferência da logica Fuzzy, no geral os dois métodos são parecidos, na fuzzificação, criação das funções de pertinência e das regras do sistema. A diferença é que no modelo Sugeno, os consequentes da regra são formados por equações paramétricas relacionadas com

as entradas e saídas do processo, já no Mamdani onde os consequentes da regra são formados por relações Fuzzy. A regra do sistema de inferência Sugeno pode ser escrita na forma (26):

$$\text{Se } (x_1 \text{ é } A_1^{j1}) \text{ e } (x_2 \text{ é } A_2^{j2}) \text{ e } \dots \text{ e } (x_n \text{ é } A_n^{jn}), \text{então } u \text{ é } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (26)$$

Outra diferença está na agregação das regras, que são agregadas como as somas ponderadas das ações de controle correspondentes a cada regra, desse modo o sistema de inferência não necessita de defuzzificação, pois a saída do sistema de inferência é uma grandeza escalar, diferente do Mamdani, que tem sua saída na forma de conjuntos Fuzzy.

Conforme Sivanandam (2007) [28], o método Sugeno é computacionalmente mais eficiente, trabalha bem com técnicas lineares como por exemplo, controle PID, otimização e é bem adequado para análise matemática. Já as vantagens do método Mamdani é ser intuitivo, amplamente aceito, e é adequado para entrada de regras baseadas na experiência de especialistas humanos [29].

4.5. Defuzificação

A defuzificação é a parte final do processo Fuzzy, o oposto da fuzzificação, onde a saída do processo de inferência na forma Fuzzy é convertida em uma expressão nítida (números reais, símbolos, etc.). Existem inúmeros maneiras para realizar essa operação, sendo os mais comuns os métodos de maior pertinência, centroide e a média da pertinência máxima [30].

4.5.1. Método maior pertinência

Essa estratégia de defuzificação consiste em usar valores extremos da função de pertinência (geralmente os máximos) para definir o valor escalar equivalente. O mesmo conjunto Fuzzy pode ter vários valores máximos iguais de saída, isso gera uma indefinição na escolha do valor máximo desejado, por isso esse método possui algumas estratégias para escolher um valor dentre todos os valores máximos [25]:

A figura (4.3) mostra a saída de um conjunto Fuzzy, que apresenta uma função de pertinência combinada de “small” com pertinência máxima “small” de 0,3 e

“médium” de 0,4, neste caso, sua pertinência máxima é 0,4, sendo assim, para o método de maior pertinência é possível a escolha das estratégias abaixo como saída.

- Esquerda do máximo (*Left of maximum – LOM*)
- Direita do máximo (*Right of maximum – ROM*)
- Centro do máximo (*Center of maximum – COM*)

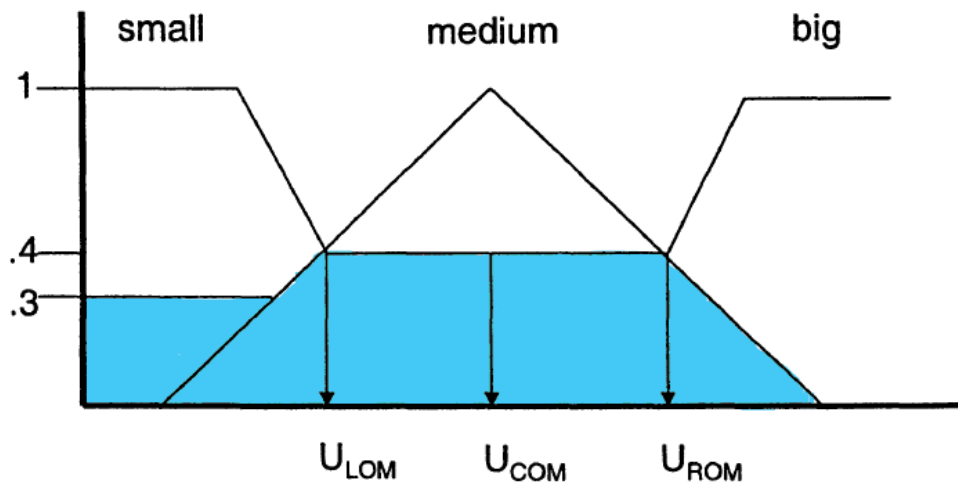


Figura 4.3: Método maior pertinência [25]

4.5.2. Método Centróide

Provavelmente o método de defuzzificação mais utilizado, também conhecido como método centro de gravidade ou centro de massa [29], esse método consiste em encontrar o centro de massa do conjunto Fuzzy de saída, dividindo a área do conjunto de saída em duas partes iguais. Do ponto de vista matemático, esse modelo corresponde ao valor esperado de probabilidade [25]. Sendo definido na equação (27), onde x' é a saída defuzzificada, $u(x)$ a função de pertinência combinada:

$$x' = \frac{\int x \cdot u(x) dx}{\int u(x) dx} \quad (27)$$

4.5.3. Método média da pertinência máxima

Método parecido e muito confundido com o de maior pertinência. Como dito no método de maior pertinência, uma saída Fuzzy pode conter vários elementos com o mesmo grau de pertencimento, sendo assim esse método calcula a média de todos

os valores com grau de pertencimento máximo, que equivale ao valor escalar defuzificado.

5. Aquisição de Dados

Para a realização das estimativas das temperaturas máximas do óleo e ponto quente do enrolamento, propostos neste trabalho, usarei o modelo IEEE C5791 e logica Fuzzy, utilizando como entrada dados de potência aparente (MVA) de um autotransformador de potência e temperatura ambiente (°C).

5.1. Dados Autotransformador

Além dos dados operacionais mencionados anteriormente, para a realização da estimativa, seguindo a norma IEEE, foram utilizados conhecimentos de placa do transformador além de informações obtidas através de ensaios de perdas no transformador, como mostrado na tabela 5.1.

Modelo do Fabricante	AMOV C – NF
Potência	3x224 MVA
Tensão Primário	525 KV
Tensão Secundário	230 KV
Tensão Terciário	13,8 KV
Frequência Nominal	60 Hz
Tipo de Refrigeração	ONAN/ONAF/ONAF2
Classe	65°C
Temperatura Ambiente Máxima	40°C
Peso Núcleo e Enrolamento	160000 Kg
Peso Tanque e Acessórios	59500 Kg
Volume de Óleo	95500 l
Perdas a Vazio	163 KW
Perdas em Carga	517 KW

Tabela 5.1: Dados técnicos do autotransformador

No gráfico 5.1, abaixo, estão expostos o perfil de potência aparente do autotransformador monofásico, subestação Blumenau, para os dias 17, 18, 19 e 20 de dezembro de 2019 (sexta-feira, sábado, domingo e segunda-feira).

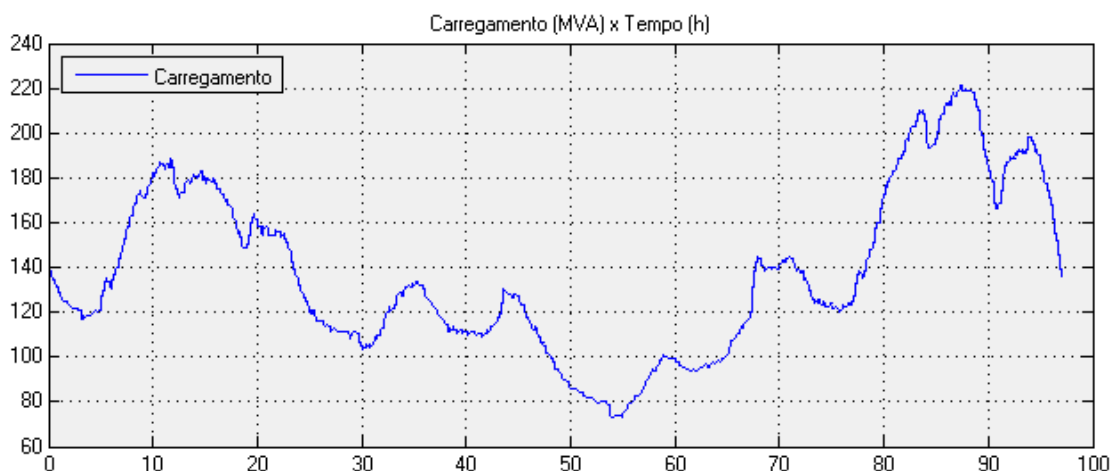


Gráfico 5.1: Potência Aparente autotransformador

5.2. Temperatura Ambiente

Além da potência aparente e dados técnicos do autotransformador, foram utilizados dados de temperatura ambiente da cidade de Itajaí-SC, estação meteorológica automática mais próxima da subestação de Blumenau-SC [31]. O Gráfico 5.2 mostra a curva de temperatura ambiente para os dias 17,18,19 e 20 de dezembro de 2019.

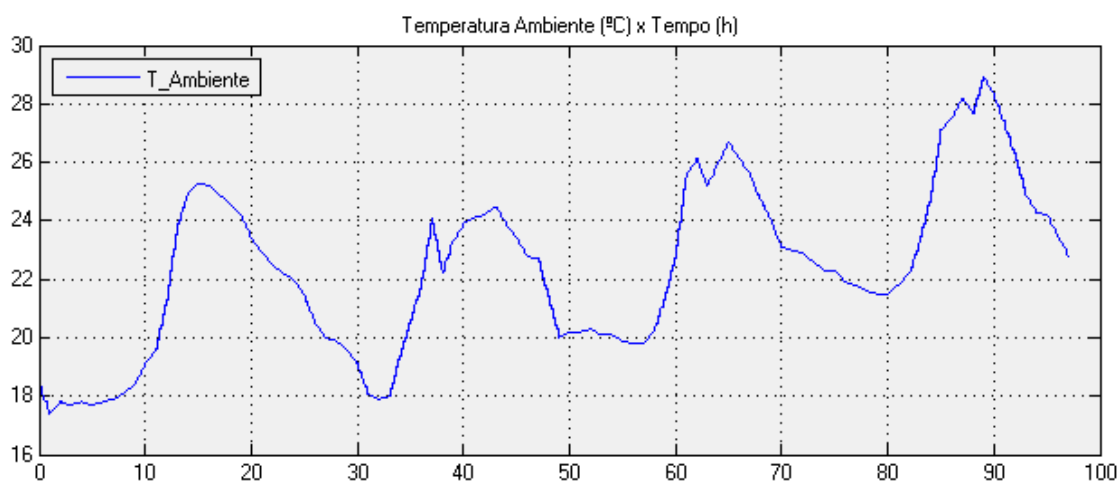


Gráfico 5.2: Temperatura Ambiente Itajaí-SC

6. Modelo lógica Fuzzy

Para a realização deste trabalho foi desenvolvido duas lógicas Fuzzy: a primeira para a realização da estimativa do topo do óleo e a segunda para estimar a temperatura do ponto quente do enrolamento, sendo que, as duas utilizam das mesmas entradas, potência aparente (MVA) e temperatura ambiente (°C).

A variável “carregamento” (car2) possui sete funções de pertinência e a “temperatura ambiente” (amb2) possui cinco, resultando em 35 regras, que são compostas na forma de If-Then:

- If (amb2 is b) and (car2 is b) then (óleo is b).
- If (amb2 is b) and (car2 is mb) then (óleo is mb).

As funções de pertinência utilizadas pelas variáveis de entrada e saída da lógica Fuzzy são dadas na tabela 6.1, sendo:

- BB – Baixo Baixo
- B – Baixo
- MB – Médio Baixo
- M – Médio
- MA – Médio Alto
- A – Alto
- AA – Alto Alto

Carregamento	BB	B	MB	M	MA	A	AA
Temperatura ambiente	B		MB	M	MA	A	
Temperatura Topo do óleo	B		MB	M	MA	A	
Temperatura Ponto Quente enrolamento	B		MB	M	MA	A	

Tabela 6.1: Funções de pertinência lógica Fuzzy

Além de ser um critério de comparação para a lógica Fuzzy, a norma do IEEE, também foi utilizada para analisar o comportamento do transformador, a fim de extrair as informações necessárias para o desenvolvimento das funções de

pertinência e regras utilizadas pelo sistema de inferência. Para o sistema de inferência foi utilizado o método “Mamdani”, e para a desfuzificação o método da “centróide”.

6.1. Temperatura Topo do Óleo

Para a temperatura do topo do óleo, os gráficos 6.1, 6.2 e 6.3 mostram respectivamente as entradas e a saída da lógica Fuzzy, juntamente com suas funções de pertinência.

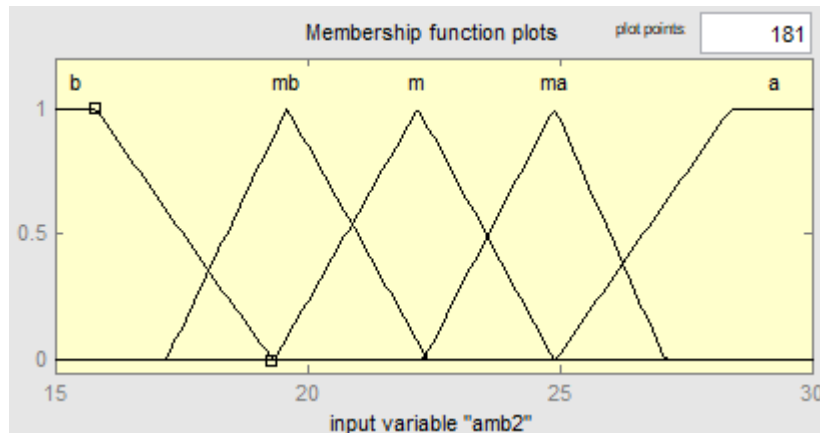


Gráfico 6.1: Funções de pertinência temperatura ambiente

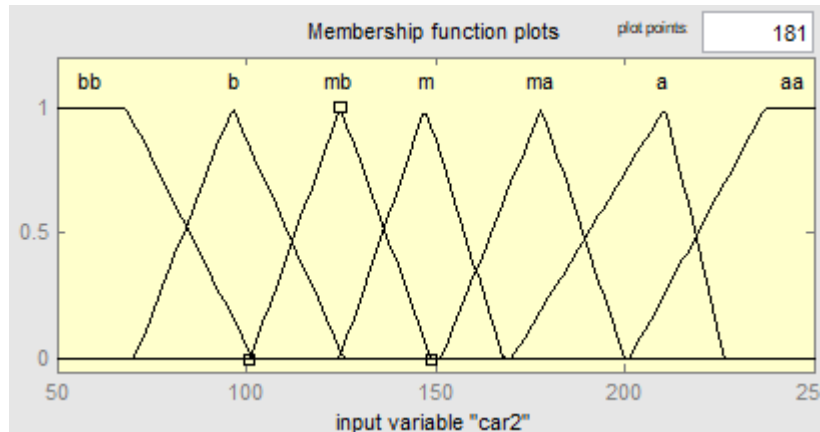


Gráfico 6.2: Funções de pertinência carregamento

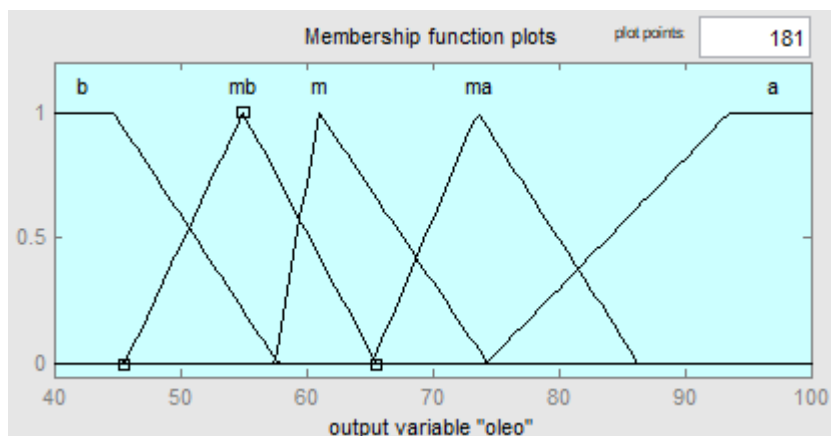


Gráfico 6.3: Funções de pertinência temperatura topo do óleo

Na tabela 6.2, são apresentadas as regras que modelam a temperatura máxima do óleo, e no gráfico 6.4 está representado o mapeamento resultante do sistema modelado.

CARVAMB	B	MB	M	MA	A
BB	B	B	B	MB	MB
B	B	B	MB	MB	M
MB	MB	MB	MB	M	M
M	MB	MB	M	M	M
MA	M	M	M	M	MA
A	MA	M	MA	MA	A
AA	MA	MA	A	A	A

Tabela 6.2: Regras Temperatura topo do Óleo

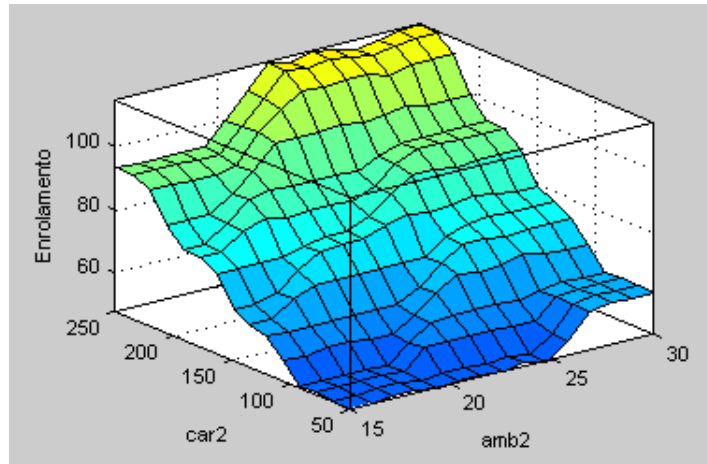


Gráfico 6.4: Mapeamento temperatura topo do óleo

6.2. Temperatura Ponto quente enrolamento

Já os gráficos 6.5, 6.6 e 6.7 mostram respectivamente as entradas e saída para a estimativa da temperatura do ponto quente do enrolamento e suas funções de pertinência.

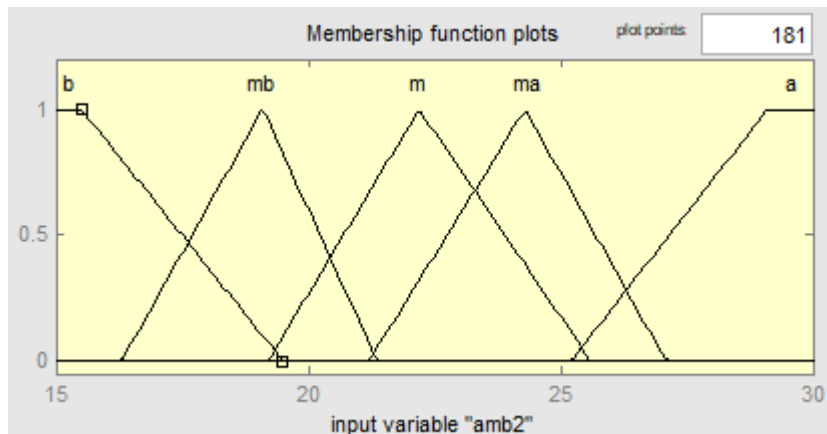


Gráfico 6.5: Funções de pertinência temperatura ambiente

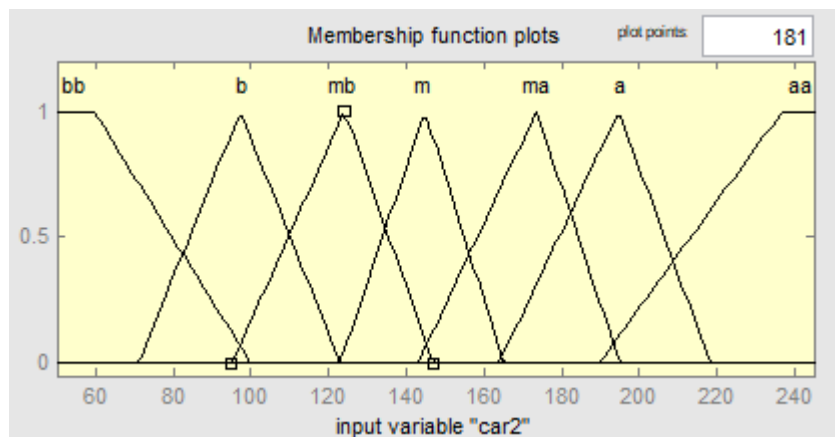


Gráfico 6.6: Funções de pertinência carregamento

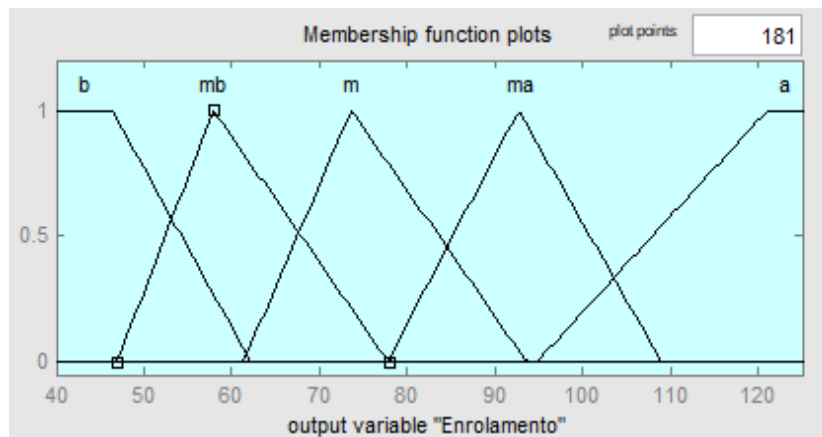


Gráfico 6.7: Funções de pertinência temperatura ponto quente enrolamento

Na tabela 6.3 estão representadas as regras da estimativa da temperatura do ponto quente do enrolamento, e no gráfico 6.8, o mapeamento do sistema gerado pelas regras.

CARVAMB	B	MB	M	MA	A
BB	B	B	B	B	MB
B	B	B	B	MB	MB
MB	MB	MB	MB	M	M
M	MB	MB	M	M	M
MA	M	M	M	MA	MA
A	M	MA	MA	MA	MA
AA	MA	MA	A	A	A

Tabela 6.3: Regras Temperatura Ponto quente do Enrolamento

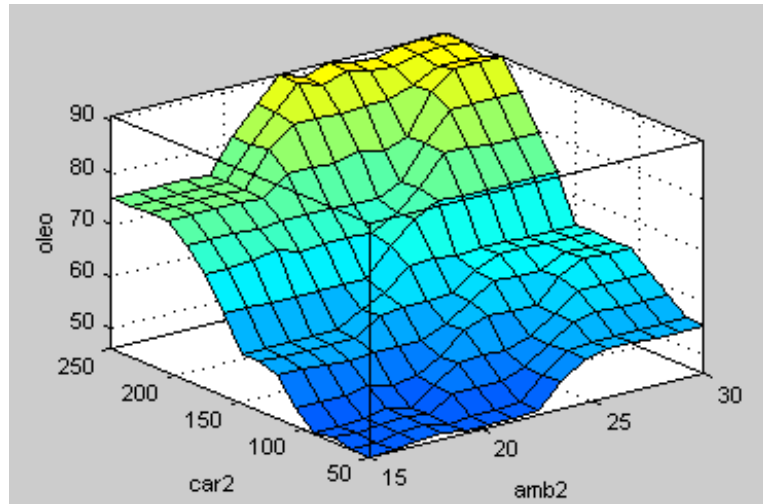


Gráfico 6.8: Mapeamento temperatura ponto quente enrolamento

7. Resultados

O trabalho foi realizado em duas etapas, na primeira etapa as temperaturas do óleo e enrolamento foram estimadas utilizando o modelo IEEE, com temperatura ambiente variável, visando extrair com maior precisão as informações necessárias para a criação das regras utilizadas pela lógica Fuzzy.

Na segunda etapa, as estimativas das temperaturas internas do transformador foram refeitas, mas dessa vez, foi utilizada como entrada a temperatura ambiente constante, conforme diz a norma IEEE C5791-2011. Desse modo foi possível realizar uma comparação fiel entre os modelos IEEE e lógica Fuzzy.

7.1. Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente variável

Como dito anteriormente, este modelo foi desenvolvido com a finalidade de expressar da melhor forma possível o sistema de temperaturas internas do transformador de potência, o algoritmo proposto pelo modelo IEEE é dividido em duas partes, a primeira é a estimativa da temperatura do topo do óleo sucedido pela estimativa da temperatura do ponto quente do enrolamento.

O gráfico 7.1, mostra a temperatura do topo do óleo e ponto quente do enrolamento utilizando o modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente variável.

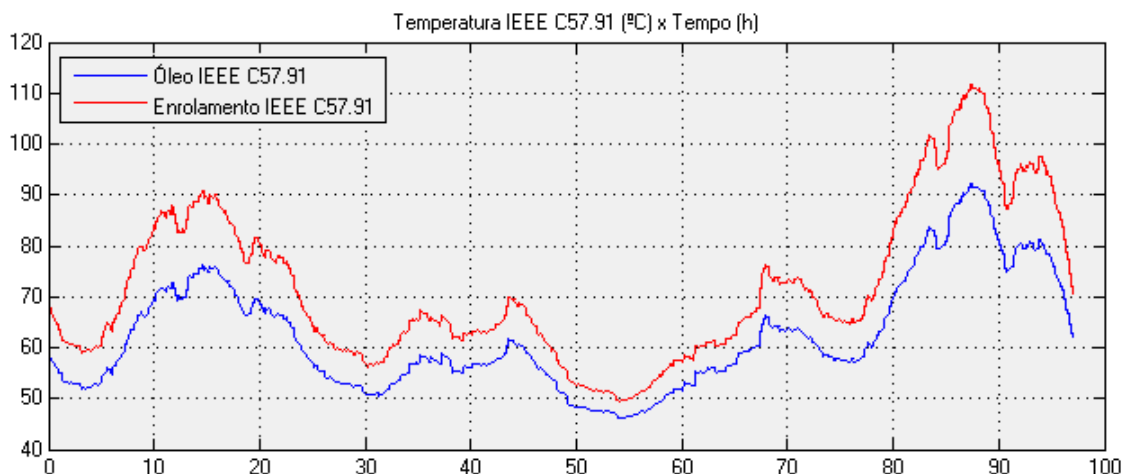


Gráfico 7.1: Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente variável

7.2. Modelo lógica Fuzzy

Após análise dos resultados das estimativas propostas no gráfico 7.1, foi desenvolvido um conjunto de regras, tabelas 6.2 e 6.3, que foram capazes de expressar a progressão das temperaturas internas no transformador de potência, gerando o resultado da temperatura do topo do óleo e ponto quente do enrolamento, como mostrado no gráfico 7.2.

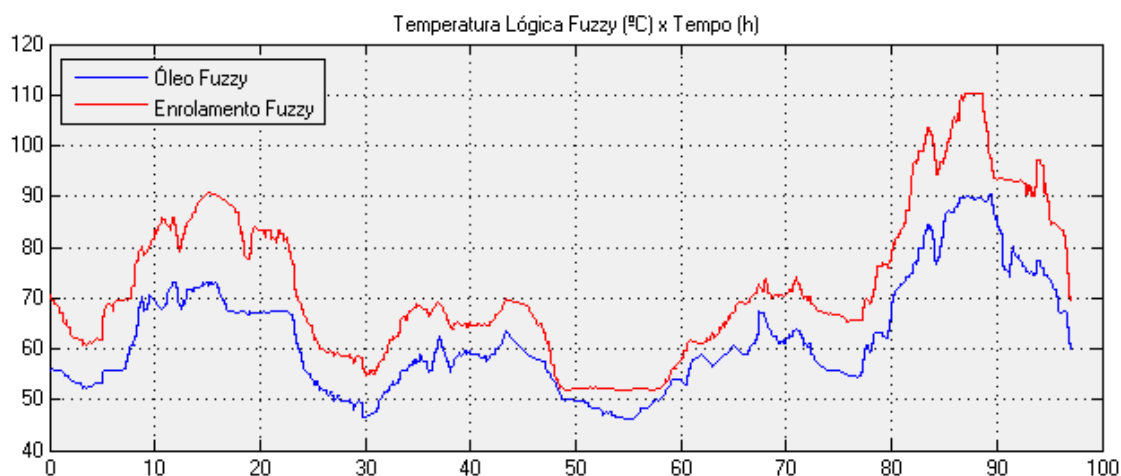


Gráfico 7.2: Modelo lógica Fuzzy

Os gráficos 7.3 e 7.4, representam um comparativo entre as estimativas realizadas pelo modelo IEEE, com temperatura ambiente variável e pela lógica Fuzzy, onde é possível ver que a lógica Fuzzy desenvolvida foi capaz de se aproximar e reproduzir com eficiência a evolução das temperaturas do topo do óleo e do ponto quente do enrolamento, respectivamente.

Além de ser um método eficiente, a nova metodologia leva vantagem em relação ao modelo proposto pelo IEEE, pela simplicidade, pois necessita de um conjunto menor de informações sobre o transformador, como ensaios de perdas e dados de placa, como peso do núcleo e volume de óleo.

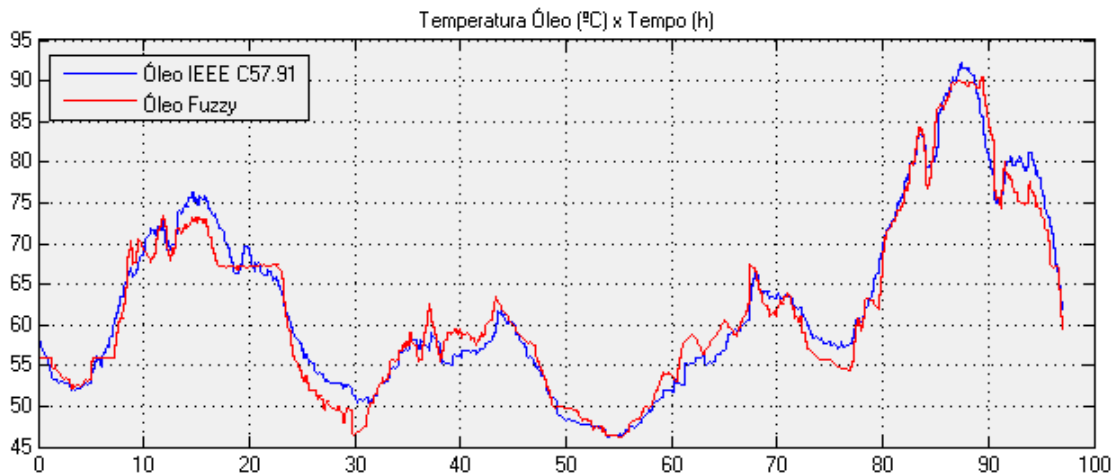


Gráfico 7.3: Comparativo temperatura máxima do óleo

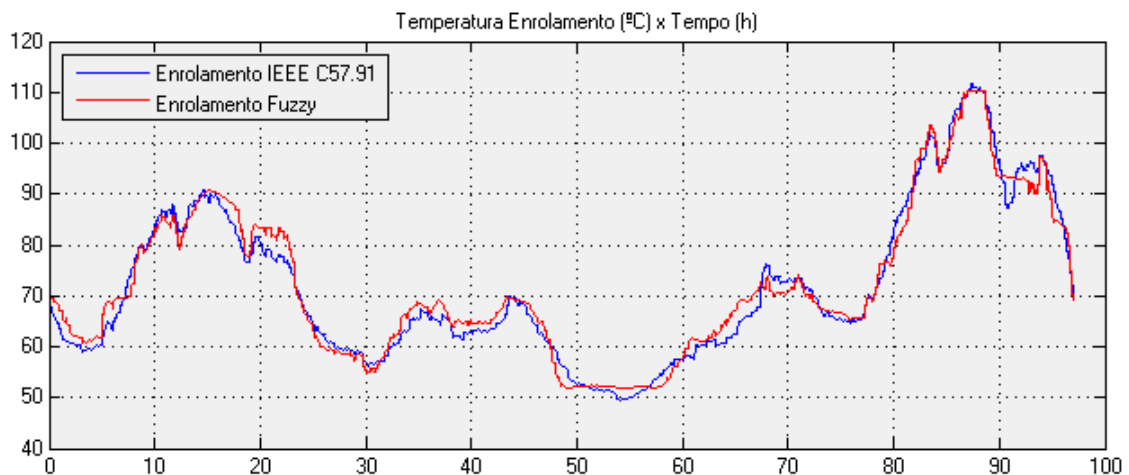


Gráfico 7.4: Comparativo temperatura ponto quente enrolamento

7.3. Modelo IEEE com temperatura ambiente constante

Uma segunda estimativa foi realizada utilizando o modelo IEEE, mas desta vez seguindo as sugestões da norma IEEE-C57.91, mais especificamente a que diz respeito ao uso da temperatura ambiente, no cálculo das temperaturas do transformador.

A norma IEEE-C57.91, considera a temperatura ambiente constante ao longo do dia, sendo composta como [06]:

- a) Temperatura média. Usa-se a temperatura média diária para o mês envolvido, calculada ao longo de vários anos.
- b) Temperatura máxima diária. Usa-se a média das temperaturas máximas diárias para o mês envolvido ao longo de vários anos.

7.3.1. Temperatura ambiente média diária

Segundo a recomendação da norma, o cálculo foi feito com a temperatura média diária dos quatro dias de estudo, equivalente a 23,2 °C que resultou nos seguintes valores de temperatura interna, gráfico 7.5.

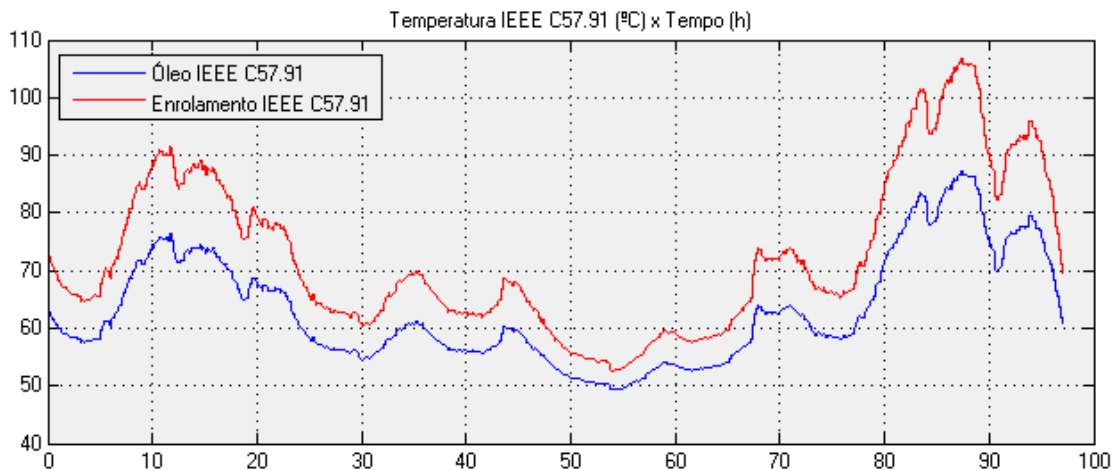


Gráfico 7.5: Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente média diária

Comparando a estimativa feita pela lógica Fuzzy com o modelo IEEE com temperatura ambiente constante, fica nítido, gráfico 7.6 e 7.7, a diferença entre as técnicas.

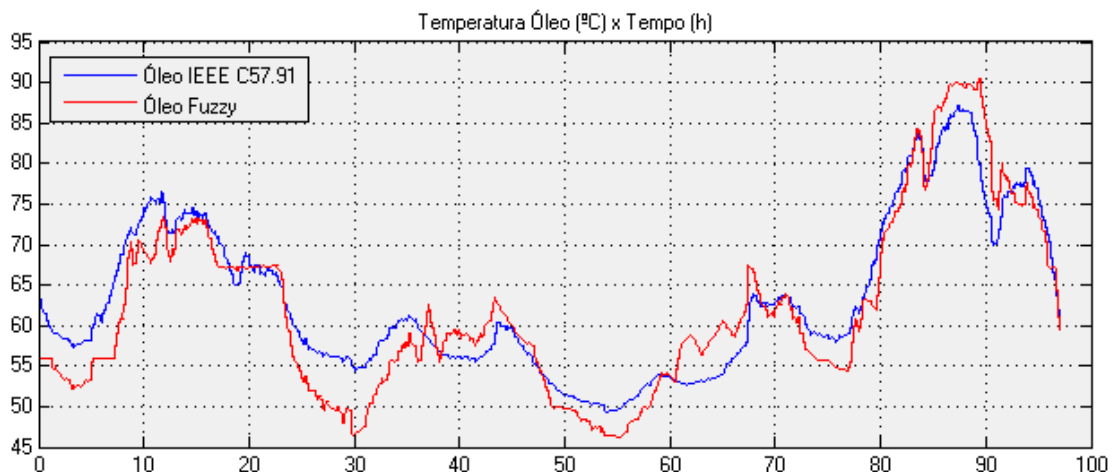


Gráfico 7.6: Temperatura topo do óleo, modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente média diária

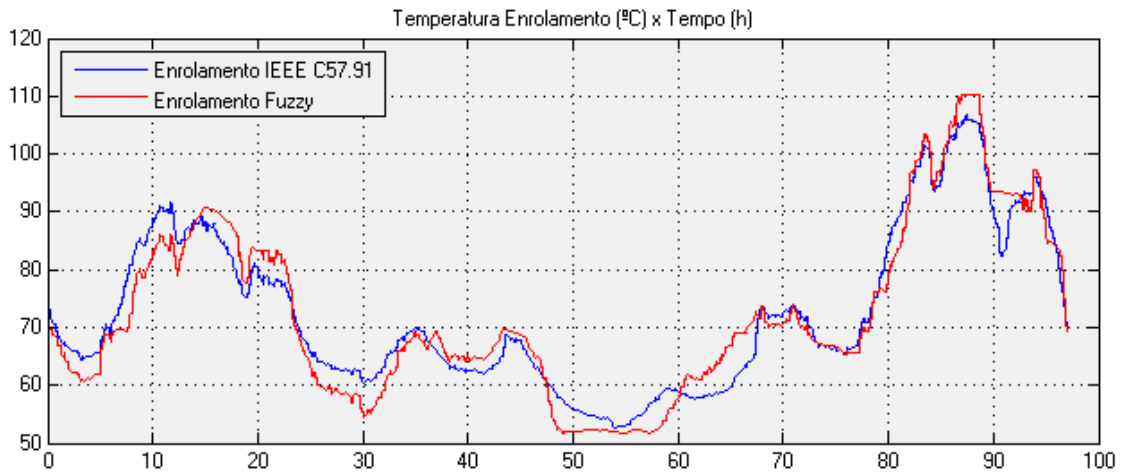


Gráfico 7.7: Temperatura ponto quente enrolamento, modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente média diária

O que se pode observar é que durante toda a simulação, o transformador operou dentro dos limites de carregamento e temperatura ambiente, no entanto, houve momentos onde as temperaturas do óleo e enrolamento ficaram cerca de 5°C mais baixas que as estimadas pela lógica Fuzzy, uma diferença que pode causar danos ao sistema, principalmente quando o sistema trabalhar com sobrecarga ou com elevada temperatura ambiente.

7.3.2. Temperatura ambiente máxima diária

Considerando a temperatura ambiente como sendo a média da temperatura ambiente máxima diária dos dias de estudo, foi possível estimar e obter as seguintes temperaturas do topo do óleo e ponto quente do enrolamento, gráfico 7.8.

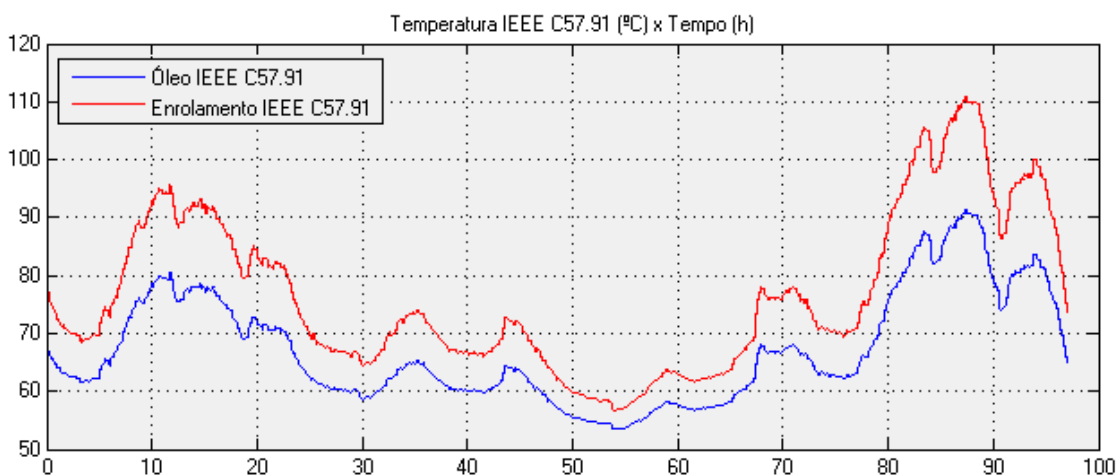


Gráfico 7.8: Modelo IEEE C5791-2011 com temperatura ambiente máxima diária

O modelo, com a temperatura ambiente foi a média das temperaturas diárias máximas, teve bom desempenho nos momentos de pico, onde o carregamento e temperatura ambiente estavam em seus valores máximos, mas com exceção a esses momentos, o valor das temperaturas ficou acima dos valores estimados pela lógica Fuzzy. Como é possível ver nas gráficos 7.9 e 7.10.

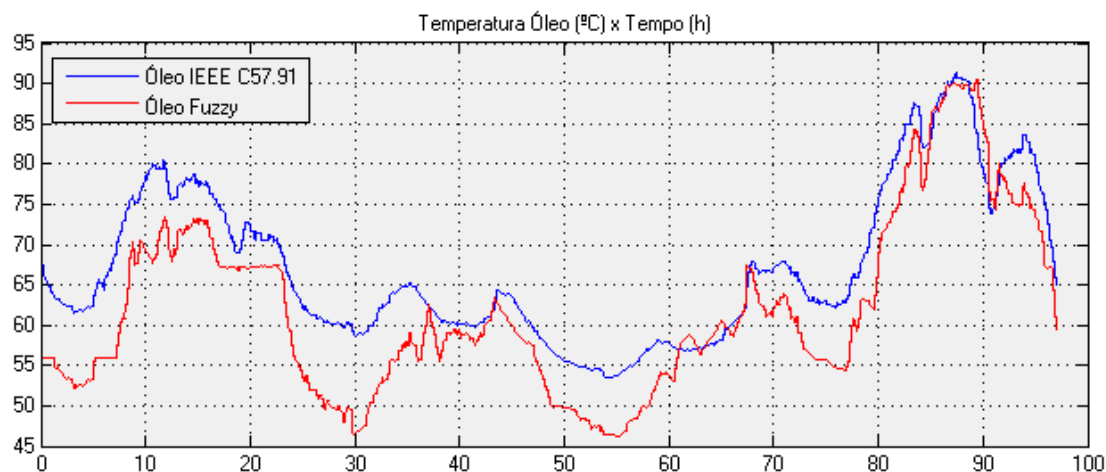


Gráfico 7.9: Topo do óleo, modelo IEEE com temperatura ambiente máxima diária

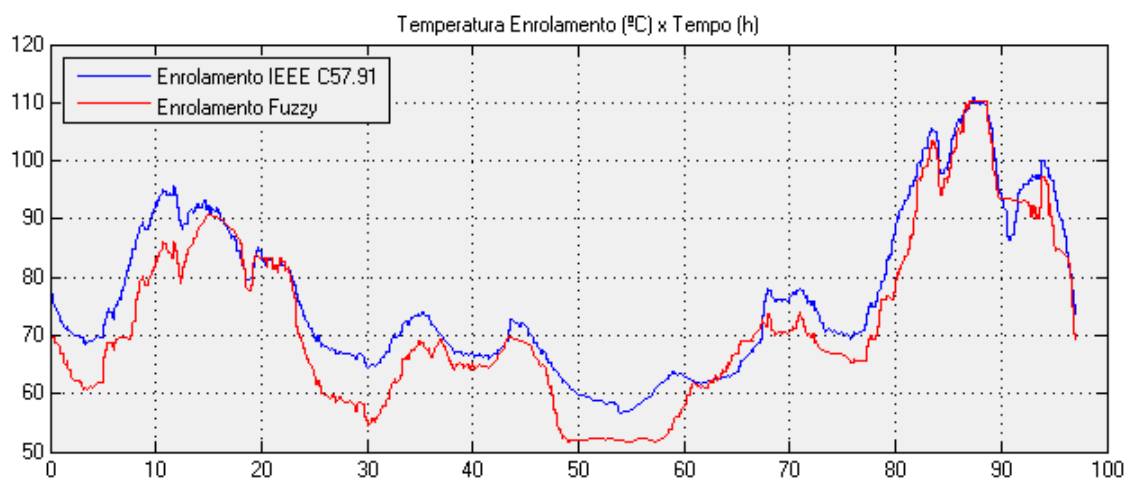


Gráfico 7.10: Ponto quente enrolamento, modelo IEEE com temperatura ambiente máxima diária

Comparando a lógica Fuzzy com os modelos IEEE, é possível ver, respectivamente, nas tabelas 7.1 e 7.2, expostas a seguir, os erros máximos e médio das temperaturas do topo do óleo e ponto quente do enrolamento.

Topo do óleo modelo IEEE com	Erro Máximo		Erro Médio	
Temp. ambiente variável	5,7 °C	-10,4%	-0,34 °C	-0,55%
Temp. ambiente média diária	10,7 °C	-18,1%	-1,15 °C	-2,39%
Temp. ambiente máxima diária	-13,1 °C	-26,9%	-5,25 °C	-9,21%

Tabela 7.1: Erros estimativa topo do óleo em relação ao modelo lógica Fuzzy

Ponto quente modelo IEEE com	Erro Máximo		Erro Médio	
Temp. ambiente variável	-6,1 °C	-8,4%	0,46 °C	0,69%
Temp. ambiente média diária	11,2 °C	-13,1%	-0,35 °C	-0,92%
Temp. ambiente máxima diária	-13,2 °C	-19%	-4,45 °C	-6,82%

Tabela 7.2: Erros estimativa ponto quente do enrolamento em relação ao modelo lógica Fuzzy

Os dois modelos, com temperatura ambiente constante, tiveram grandes erros de medição, sendo que o modelo com temperatura ambiente máxima diária teve maior precisão no momento de pico do carregamento e temperatura ambiente.

Já o modelo com temperatura ambiente diária média, teve pior desempenho nos momentos onde a temperatura ambiente estava muito abaixo ou muito acima da média diária.

Estas constatações podem ser vistas nos gráficos, 7.11 e 7.12 para a temperatura do topo do óleo e 7.13 e 7.14 para o ponto quente do enrolamento, que mostram um comparativo entre todas as estimativas realizadas, neste estudo.

O estudo, mostrou que as estimativas propostas pela norma IEEE são uma das melhores técnicas para se estimar as temperaturas internas do transformador de potência, mas o uso da temperatura ambiente constante durante o dia faz com que falte precisão para a estimativa, por isso deve-se utilizar a temperatura ambiente variável ao longo do dia.

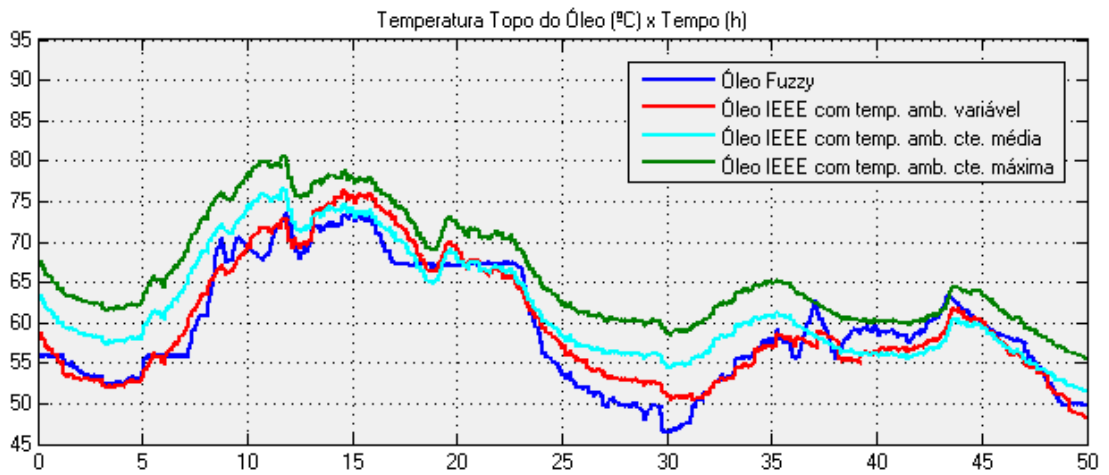


Gráfico 7.11: Estimativas temperatura topo do óleo, dias 17 e 18

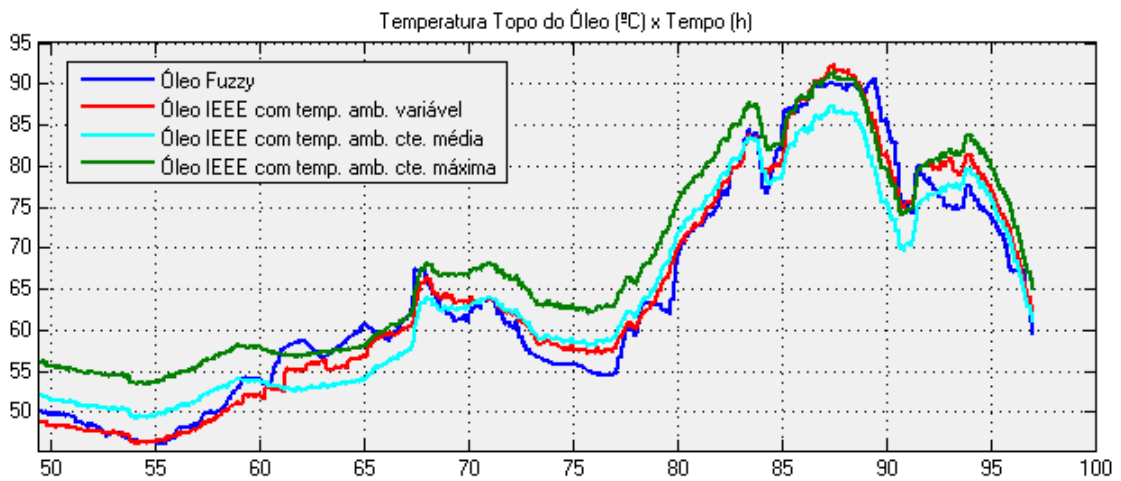


Gráfico 7.12: Estimativas temperatura topo do óleo, dias 19 e 20

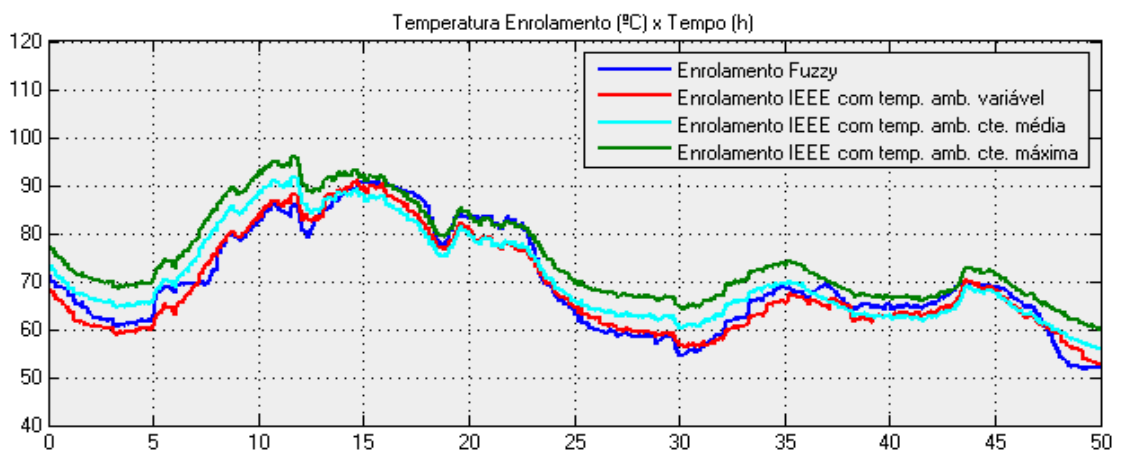


Gráfico 7.13: Estimativas temperatura ponto quente enrolamento dias 17 e 18

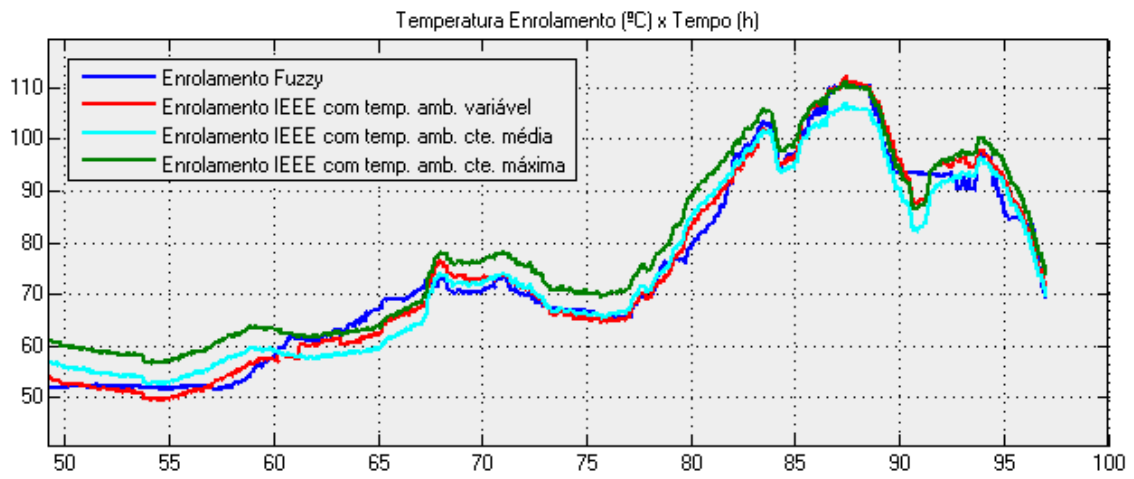


Gráfico 7.14: Estimativas temperatura ponto quente enrolamento dias 19 e 20

8. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado uma nova metodologia utilizando lógica Fuzzy, para realizar a estimação da temperatura interna dos transformadores de potência, juntamente com uma análise da norma IEEE-C5791 no que diz respeito ao uso da temperatura ambiente constante ao longo do dia.

Dessa forma a lógica difusa foi capaz de estimar a temperatura máxima do óleo e ponto quente do enrolamento com precisão, se mostrando vantajosa em relação a norma IEEE-C57.91 pois a mesma necessita de dados técnicos do transformador de potência para a estimação das temperaturas, como ensaios a vazio, de curto-circuito e dados de placa, o que torna a lógica Fuzzy mais simples e eficiente.

Com relação a norma IEEE-C57.91, entende-se que o uso da temperatura ambiente constante ao longo do dia, implica no aumento do erro das estimativas, que pode ser determinante para o bom desempenho do sistema. Sendo assim, sempre que possível a temperatura ambiente deve ser considerada como variável ao longo do dia.

O método de estimação da temperatura máxima do óleo e ponto quente, utilizando logica difusa, também pode ser usado em conjunto com o modelo IEEE ou sensores, detectando, além de distúrbios térmicos, falhas nas medições dos sensores, aumentando, desse modo, a confiabilidade do sistema.

As regras utilizadas pela lógica Fuzzy, durante o trabalho, podem ser usadas para outros transformadores da mesma classe (65°C) e com estagio de ventilação forçada (ONAF), sendo necessário somente a adequação do transformador em relação aos dados de carregamento e alguns ajustes nas funções de pertinência.

Para trabalhos futuros, é importante que se analise uma quantidade maior de dados, para que o modelo criado possa abranger todas as possibilidades de carregamento que possam ocorrer no sistema, inclusive quando o transformador trabalhar em sobrecarga além de analisar as temperaturas ambientes para todas as estações do ano.

Todas as constatações deste estudo, dão indícios da importância do desenvolvimento de um novo sistema Fuzzy, que analise um número maior de variáveis, além da temperatura e carregamento, para que o sistema seja capaz de

prever outros tipos de falhas que podem acontecer no transformador. Isso, sem dúvidas, garantiria uma precisão maior nas manutenções, com previsibilidade de eventuais trocas preventivas, que resultariam em melhora no gerenciamento e tomadas de decisão no setor, com conseqüente estabilidade do Sistema Elétrico do país.

9. Referências Bibliográficas

- [01] FREITAS, Antônio A. C. de; SILVA, Ivan N. da; SOUZA, André N. de. Aplicação de redes neurais na estimação da temperatura interna de transformadores de distribuição imersos em óleo. Sba Controle & Automação, Campinas, v. 13, n. 3, p. 266-274, Sept. 2002 .
- [02] PEDROSO, Bruno Cosse et al. Análises de custos na gestão da manutenção e reparos em oficina de transformadores de potência. XXIV SIMPEP–Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru: SIMPEP, 2017.
- [03] CIGRÉ, W.G. "A2. 50.", "Guia de Manutenção para Transformadores de Potência". Brasil: CIGRÉ BRASIL, 2013.
- [04] SCHMITZ, W.I, L.N CANHA, and T.B MARCHESAN. "RANKING DE SUBESTAÇÕES PARA MANUTENÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM FOCO NA MANOBRABILIDADE E FLEXIBILIDADE."
- [05] ALEXANDRE, Marcelo; CARRIJO, Daniel; AL, Alvaro Jorge. Arquiteturas de monitoramento e diagnóstico de transformadores de potência. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, v. 18, 2017.
- [06] IEEE Standards Association. "IEEE Guide for Loading Mineral- Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators". IEEE C5791-2011.
- [07] Huang Xiaofeng, Zhou Lijun, Wu Guangning and Du Qingquan, "Simulation models of transformer hot-spot temperature," 2012 IEEE 10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Bangalore, 2012, pp. 1-4.
- [08] H. Nguyen, G. W. Baxter and L. Reznik, "Soft Computing Techniques to Model the Top-oil Temperature of Power Transformers," 2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, Toki Messe, Niigata, 2007, pp. 1-6.
- [09] M. Ebenezer and P. S. Chandramohan Nair, "Determination of winding temperature of a distribution transformer using soft computing techniques," 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India, New Delhi, 2010, pp. 1-6.

- [10] Lisita, Luiz Roberto. "Conversão eletromecânica de energia." Apostila. Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1990.
- [11] BECHARA, RICARDO. Análise de Falhas em Transformadores de Potência. 2010. 102p Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2010.
- [12] ONS-DPL-REL-0093, "Relatório de Análise Estatística de Desligamentos Forçados de Equipamentos Referente ao ano de 2018",2019.
- [13] BOSSI, A. et al. An international survey on failures in large power transformers in service. Cigré Electra, v. 88, p. 21-48, 1983.
- [14] PE, William H. Bartley. Analysis of transformer failures. In: 36th Annual Conference of International Association of Engineering Insurers–Stockholm. 2003.
- [15] FERREIRA, Daniel Augusto Pagi. Análise de falhas em transformadores de distribuição por metodologia forense. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [16] IEEE STANDARDS ASSOCIATION et al. IEEE Std 1159-2009. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2009.
- [17] EMSLEY, A.M.; STEVENS, G.C. (1994). Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers. In: IEE SCIENCE MEASUREMENT AND TECHNOLOGY, 1994. Proceedings... New York: IEE. v.141, n.5, p. 324-334.
- [18] DE SENNA, Sidney Lima. Computação evolucionária aplicada ao diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência utilizando dados de cromatografia. 2010.
- [19] Leite, Rodrigo. Disponível em: <<https://blog.wika.com.br/know-how/manometro-com-tubo-bourdon-principio-de-funcionamento/>>. Acesso em: 16 de jul. 2020.
- [20] ORTIZ, Mauricio. Disponível em: <<http://academico.riogrande.ifrs.edu.br/~mauricio.ortiz/INSTRUMENTA%C7%C3O/Aula%201%20-%20Metrologia.pdf>>. Acesso em: 16 de jul. 2020.

- [21] LANDUCCI JÚNIOR, Amleto. Manutenção pré-corretiva em transformadores de potência: um novo conceito de manutenção. 2017.
- [22] SWIFT, Glenn; MOLINSKI, Tom S.; LEHN, Waldemar. A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit. IEEE transactions on Power Delivery, v. 16, n. 2, p. 171-175, 2001.
- [23] SUSA, Dejan; LEHTONEN, Matti; NORDMAN, Hasse. Dynamic thermal modelling of power transformers. IEEE transactions on Power Delivery, v. 20, n. 1, p. 197-204, 2005.
- [24] AGUADO, Alexandre Garcia; CANTANHEDE, Marco André. Lógica Fuzzy. Artigo sem, 2010.
- [25] Zimmermann, Hans-Jürgen. "Fuzzy set theory and its applications". Springer Science & Business Media, 2011.
- [26] AGUIAR, HIME et al. Inteligência Computacional Aplicada à Administração. Economia e Engenharia em Matlab, Editora Thompson, 2007
- [27] NASCIMENTO JÚNIOR, Newton Teixeira do et al. Uma metodologia para monitoramento das condições operativas de transformadores de potência e análise de tendências baseada em lógica Fuzzy. 2010.
- [28] SIVANANDAM, S. N. et al. Introduction to Fuzzy logic using MATLAB. Berlin: Springer, 2007.
- [29] MENESES, Leonardo Telino de. Automação da detecção de fraudes em sistemas de medição de energia elétrica utilizando lógica Fuzzy em ambiente SCADA. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [30] CAMPOS FILHO, Pio et al. Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica Fuzzy. 2004.
- [31] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 15 de jun. 2020.