

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**UM ESTUDO SOBRE MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO  
DE FALHAS EM TRANSFORMADORES**

**Bruno Moser Nunes  
SÃO CARLOS, JUNHO DE 2014**



Bruno Moser Nunes

UM ESTUDO SOBRE MÉTODOS DE IDENTIFICAR  
FALHAS EM TRANSFORMADORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

SÃO CARLOS  
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

N972u Nunes, Bruno  
UM ESTUDO SOBRE MÉTODOS DE IDENTIFICAR FALHAS EM  
TRANSFORMADORES / Bruno Nunes; orientador Rogério  
Andrade Flaúsino. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2014.

1. Detecção de falhas. 2. Transformadores. 3.  
Análise de gás dissolvido. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Bruno Moser Nunes

Título: "Um estudo sobre métodos de identificação de falhas em transformadores"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 18/06/2014,

com NOTA 5,0 (cinco pontos), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino - (Orientador - SEL/EESC/USP)*

*Mestre Marcel Ayres de Araujo - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

*Mestre Cesar Henrique Rossinoli Martins - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mãe, que, praticamente, abdicou de sua vida em função da minha e tem sido o maior incentivador nesta minha jornada de aprendizado. Dedico também à Ana Paula que durante quase toda minha graduação foi uma amiga, uma companheira que esteve sempre ao meu lado.





# AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a toda minha família, por todo o apoio nesses 3 anos de USP.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino, que me apoiou e me auxiliou nesse trabalho e por toda minha graduação.

Aos meus amigos da Física de Rio Claro, em especial: Caio Wetterich e Tiago Botari.

Aos meus amigos da USP-São Carlos, em especial: Murilo, Rodrigão, Marza, Helena, Mundim, Mina, Matheus, Vitão, Camila, Maurício.



# Resumo

O desenvolvimento de novas técnicas de detecção de falhas em transformadores vem crescendo muito nos últimos anos. Atualmente, existem diversas técnicas de diagnóstico de falhas que relacionam o gás dissolvido no Óleo Mineral Isolante (OMI) com a falha. Nesse trabalho foi feita uma revisão das técnicas mais utilizadas na literatura (Gás chave, Rogers, etc), dos ensaios físico-químicos utilizados para caracterizar o óleo mineral isolante e ensaios cromatográficos, utilizados para determinar a concentração de gases dissolvidos no OMI. Foram apresentados conceitos gerais sobre a Lógica Fuzzy e por fim apresentou-se uma revisão da literatura sobre a utilização de Logica Fuzzy na detecção de falhas em transformadores.

Palavras-chave: Detecção de falhas, Transformadores, Analise de gás dissolvido.



## **ABSTRACT**

The development of new techniques for fault detection in transformers has been increasing in recent years. Currently, there are several techniques for diagnosing faults that relate dissolved in the insulating oil (IMO) with the fault gas. This work was done a review of the techniques used in the literature (key Gas, Rogers, etc.), the physical and chemical tests used to characterize the insulating oil and chromatographic assays used to determine the concentration of dissolved gases in OMI. Was presented general concepts of fuzzy logic and order is presented a literature review on the use of Fuzzy logic in detecting faults in transformers.

Keywords: Fault Detection, Transformers, Dissolved Gas Analysis



# Sumario

1.	Introdução .....	3
1.1.	Motivação e relevância do trabalho.....	3
1.2.	Objetivos .....	5
1.3.	Organização do TCC .....	5
2.	Manutenção e Ensaio em Transformadores .....	7
2.1.	Manutenções em transformadores de potência .....	8
2.1.1.	Manutenção corretiva.....	8
2.1.2.	Manutenção preventiva.....	8
2.1.3.	Técnica preditiva.....	8
2.2.	Óleo mineral.....	9
2.3.	Papel Isolante Impregnado .....	9
2.4.	Ensaio Físico-Químico .....	9
2.4.1.	Ensaio De Cor.....	10
2.4.2.	Densidade.....	10
2.4.3.	Perdas Dielétricas.....	10
2.4.4.	Rigidez Dielétrica.....	10
2.4.5.	Teor De Água.....	10
2.4.6.	Tensão Interfacial.....	11
2.4.7.	Índice De Neutralização.....	11
2.5.	Índice De Qualidade Do Sistema (OQIN).....	11
2.6.	Análise Cromatográfica dos Gases Dissolvidos No OMI.....	12
3.	detecção de falhas em Transformadores .....	15
3.1.	Gás Chave.....	16
3.2.	Método de Doernenburg.....	18
3.1.	Método de Rogers .....	19

3.1. Método IEC .....	20
3.1. Método IEEE® .....	22
3.2. Triângulo de Duval.....	22
4. Sistema Fuzzy .....	27
4.1. Definições Básicas .....	28
4.1.1. Operações com Conjunto Fuzzy.....	29
4.2. Aplicações de sistemas inteligentes no diagnóstico de falhas em transformadores.....	30
5. Conclusão.....	33
6. Bibliografia .....	35



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação e Relevância do Trabalho

O desenvolvimento de uma nação está relacionado diretamente com a quantidade de recursos energéticos que essa tem disponível, sendo indispensável para o crescimento de um país o aumento da sua geração, transmissão e distribuição dos recursos energéticos. O Brasil espera dobrar sua capacidade de geração até 2030, investindo cerca de US\$ 800 bilhões de dólares [1].

Dentre o conjunto de equipamentos do sistema elétrico, os transformadores de potência se destacam tanto por sua importância quanto pelos custos associados aos mesmos. Os transformadores são máquinas estáticas que transferem energia elétrica de um circuito para o outro, mantendo a mesma frequência e, normalmente, adequando os valores de tensão e, eventualmente, os de corrente. De maneira geral, a função de um transformador de potência é fazer a adequação dos níveis de tensão entre a geração, a transmissão e a distribuição [1].

Dentes os entes de formação do transformador de potência se destaca seu sistema de isolamento que é, basicamente, formado pelo Óleo Mineral Isolante (OMI) e pela isolamento de celulose. Esses dois elementos ganham destaque pois é neles, que na maioria dos casos, se iniciam as falhas nos transformadores.

A detecção de defeitos em transformadores de potência podem gerar diversos benefícios, como por exemplo: reduzir custo em manutenção, prevenir uma interrupção no fornecimento de energia, prevenir uma falha no transformador irreparável, entre outros. A Figura 1.1 ilustra um transformador de potência, o qual pode chegar a conter mais de 80 mil litros de óleo. Assim, o desenvolvimento de técnicas cada vez mais precisas e confiáveis são de grande importância nessa área de detecção de falhas em transformadores de potência [1].



**Figura 1.1:** Transformador de Potência 225 MVA e 275KV [2].

Com o aumento de novas tecnologias na detecção de falhas na área de energia elétrica, o sistema vem se tornando mais confiável e com maior qualidade. Países do primeiro mundo vem utilizando tais técnicas cada vez mais, otimizando a manutenção e melhorando o diagnóstico em transformadores de potência [3].

Hoje existe uma gama muito grande de técnicas de detecção de falhas em transformadores de potência, com destaque para o monitoramento de grandezas elétricas [4], monitoramento acústico do transformador [5], análise físico-química do óleo isolante, verificação da concentração de gases dissolvidos no OMI do transformador, entre outras.

Os ensaios físico-químicos permitem caracterizar o OMI, nas seguintes propriedades: a cor, a densidade, a rigidez dielétrica, a tensão interfacial, o teor de água, o índice de neutralização e o fator de potência do óleo mineral. Esses podem ser realizados no local e com o transformador em funcionamento, ou seja, sem interrupção do fornecimento de energia elétrica e com baixo custo [4].

A identificação de falhas pela análise de gases dissolvidos no OMI é feita através de ensaios cromatográficos, que resultam nas concentrações dos gases dissolvidos no mesmo. Essa análise tem relação direta com as falhas que ocorrem nos transformadores, visto que, as falhas provocam descargas parciais, descargas de alta energia, efeito corona, sobreaquecimento, entre outras, tais efeitos podem alterar as propriedades físico-químicas do OMI e a formação de gases que se dissolvem no óleo [4].

Diante dos dados apresentados é possível evidenciar a contribuição desse trabalho, ressaltando à importância e à necessidade da utilização de técnicas preditivas na manutenção preventiva e do acompanhamento do estado dos transformadores, visando um aprimoramento dos procedimentos de manutenção e a diminuição das interrupções de serviço por falha e por defeito destes equipamentos, que é fundamental para o sistema elétrico de potência.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo desse Trabalho de Conclusão de Curso consiste em uma investigação na literatura científica relacionada a detecção de falhas em transformadores de potência, identificando como que cada uma das metodologias pode ser aplicada e quais são os resultados possíveis de serem alcançado.

## **1.3. Organização do TCC**

O Trabalho está organizado em 5 capítulos. No Capítulo 1 tem-se uma introdução com relação ao sistema de energia mundial e brasileiro, a importância e o objetivo do trabalho.

No Capítulo 2 apresentam-se aspectos sobre manutenção preventiva, ensaios físico-químicos e aspectos das análises cromatográficas do estudo do óleo isolantes.

No Capítulo 3 foram abordadas as principais técnicas de diagnóstico de falhas em transformadores de potência utilizando análise de gases dissolvidos em óleo mineral isolante.

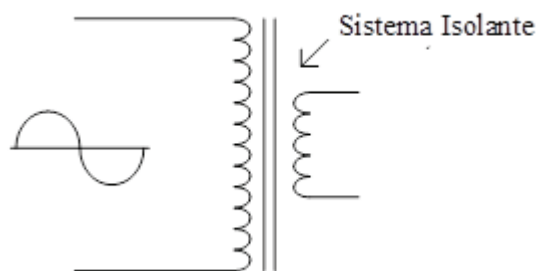
Para o Capítulo 4, tem-se uma descrição do sistema de inferência fuzzy e trabalhos científicos sobre sua utilização na detecção de falhas em transformadores.

Finalmente, o Capítulo 5 trata da conclusão desse trabalho.



## 2. MANUTENÇÃO E ENSAIOS EM TRANSFORMADORES

O transformador é um equipamento de extrema importância e de custos elevados constituído, resumidamente, por enrolamentos e por um núcleo. Esses enrolamentos são dispostos de tal forma que o fluxo magnético produzido por um deles age sobre outro. Já o núcleo é o meio pelo qual o fluxo magnético flui. A Figura 1.2 ilustra o esquema básico de um transformador.



**Figura 1.2:** Esquema básico de um transformador

O sistema de isolamento é basicamente constituído pela parte sólida (papel/celulose) e a parte líquida (óleo mineral isolante). O tempo de vida de um transformador depende da manutenção e da detecção de defeitos. Para maximizar o tempo de vida de um transformador é necessário conhecer as falhas que podem ocorrer, assim o monitoramento regular se torna uma ferramenta essencial para detectar falhas incipientes.

Considera-se “falha” uma anomalia em um equipamento que pode levar o mesmo a funcionar de forma irregular e/ou aquém de sua capacidade nominal, de forma que se esta não for corrigido a tempo pode evoluir e levar o equipamento a interrupção e ser retirado de serviço [6].

Os quatro principais tipos de falha em um transformador são [7]:

- Arcos, ou danos por corrente elevada.
- Descargas de baixa energia, ou descargas parciais.
- Aquecimento local, ou pontos quentes.
- Aquecimento global, devido à falta de refrigeração ou sobrecarga.

Devido às sérias consequências, é de muita importância identificar essas falhas. Falhas no papel isolante são geralmente mais prejudiciais que aquelas que acontecem no óleo isolante. A celulose se encontra em uma área de grande campo elétrico e caso ela seja danificada, há grandes possibilidades

de ocorrência de curto-circuito ou arcos elevados de corrente. Felizmente, as falhas no papel isolante são em geral menos frequentes que aquelas que ocorrem no OMI [1].

## **2.1. Manutenções em Transformadores de Potência**

A busca por técnicas que podem antecipar ou prevenir desligamentos indesejados levou as concessionária de energia a desenvolverem técnicas de manutenção que atuam de forma constante e com alta eficiência na prevenção de falhas, tornando o sistema mais confiável [3].

Anteriormente os programas de manutenção em transformadores eram feitos por inspeções e/ou ações periódicas, muitas vezes sugeridas pelo fabricante ou por experiência. Esse tipo de técnica proposta, funciona para a maiorias das falhas, mais causa interrupções no funcionamento do equipamento desnecessárias, gerando custo e tempo para as empresas [3].

Nos últimos anos os equipamentos do sistema elétrico melhoraram em relação a sua segurança na ocorrência de falhas, mas tal aumento ainda não é suficiente para descartar a manutenção de tais equipamentos. As técnicas de manutenção atualmente, atuam de forma a aumentar a vida útil e reduzir a quantidade de falhas nos equipamentos. Entre essas pode-se destacar a manutenção preventiva e a preditiva.

### **2.1.1. Manutenção Corretiva**

A manutenção corretiva tem como principal ponto, restaurar a condição anterior do defeito ou falha no equipamento, podendo ser realizada com base no tempo de operação ou em caso de emergência [3~~Erro! Indicador não definido.~~]. Com isso, a manutenção corretiva se torna em alguns asos muito custosa financeiramente, tanto pela correção da falha inesperada como pela interrupção no trabalho do equipamento [3].

### **2.1.2. Manutenção Preventiva**

A manutenção preventiva atua de forma sistemática, a prevenir falhas ou defeitos nos equipamentos, tentando corrigir desgastes naturais e/ou visíveis, através de um cronograma de manutenção previamente elaborado. Podendo ser realizado periodicamente ou através de outros critérios. A técnica tem como objetivo principal tentar prevenir a redução do desempenho do equipamento. [3] [10]

### **2.1.3. Técnica Preditiva**

A técnica preditiva se desenvolveu para acompanhar parâmetros e/ou dados coletados pelo monitoramento do equipamento de modo sistemático, visando a necessidade ou não de intervenção. Essa técnica tem como objetivo de prever a ocorrência de defeitos ou falhas, com base nos dados

coletados previamente, de forma a manter o equipamento funcionando pelo maior tempo possível sem intervenções desnecessárias.

Assim pode-se economizar na manutenção desnecessária, baseada no tempo como a manutenção preventiva, e apenas atuar quando realmente é necessária, prolongando desempenho e a vida útil do equipamento [8] [10].

## **2.2. Óleo Mineral**

O óleo mineral isolante utilizado em transformadores é extraído do petróleo e suas características vão depender da natureza desse petróleo e do processo utilizado na sua preparação. O óleo mineral isolante é constituído em sua maioria de uma mistura de hidrocarbonetos. Tendo em vista a presença de um elevado número de componentes em diferentes quantidades em sua composição, a caracterização de um óleo mineral para utilização como isolante não é feita pela composição da mistura do mesmo, mas por uma série de parâmetros físico-químicos, os quais são afetados pela sua composição e por apresentarem reflexos em sua utilização. Assim, o estabelecimento de limites para estes parâmetros tem como objetivo alcançar uma uniformidade de comportamento como isolante e referências de qualidade para sua utilização [8].

Quando o OMI perde suas propriedades isolantes, há duas formas para recuperação do transformador: a substituição ou a regeneração. Em ambos os casos, é de extrema importância verificar se esse fluido atende às características dielétricas, a fim de evitar a degradação prematura do isolamento sólido do transformador

## **2.3. Papel Isolante Impregnado**

O sistema de isolação formado pelo conjunto papel-óleo é responsável pela rigidez dielétrica, mantendo o isolamento entre os terminais de baixa e alta tensão, e entre fases. Normalmente, o papel isolante utilizado em transformadores é, depois de seco, impregnado de verniz ou resina e posteriormente de óleo isolante.

A degradação do papel ocorre em função basicamente do efeito da temperatura, oxigênio e água, fatores que afetam principalmente as propriedades mecânicas do papel.

## **2.4. Ensaio Físico-Químico**

Os ensaios físico-químico caracterizam o OMI a partir de uma amostra coletada do transformador, podendo esse estar em funcionamento. Com a amostra coletada é possível determinar diversos parâmetros relacionados ao estado do óleo. Os resultados podem ser usados para estabelecer parâmetros de manutenção nos transformadores. Os valores fora dos limites especificados indicam a necessidade de tratamento; de substituição ou de regeneração do óleo mineral [8] [9].

Nesse trabalho foi abordado 7 ensaios físico-químico, estes são:

- Ensaio de cor;
- Densidade;
- Perdas dielétricas;
- Rigidez dielétrica;
- Teor de água;
- Tensão interfacial;
- Índice de neutralização.

### **2.4.1. Ensaio De Cor**

O ensaio consiste em comparar a cor do OMI com uma escala padrão de 0 a 8. O OMI é colocado em um vidro e um computador identifica qual a cor do OMI comparando com a escala de cores padrão, se a cor estiver entre dois valores, há uma interpolação do resultado final. Esse ensaio também verifica a existência de partículas sólidas e água em suspensão [10].

### **2.4.2. Densidade**

Nesse ensaio é medido a densidade relativa do óleo como relação entre a massa de determinado volume de óleo e a massa de igual volume de água pura a temperatura de 15°C [10].

### **2.4.3. Perdas Dielétricas**

As perdas dielétricas são ensaios feitos em um líquido isolante submetido à um campo elétrico alternado. Essa medida está relacionada com a dissipação de calor pelo líquido, ou seja, corresponde a corrente dissipada pelo líquido e a energia necessária para polarizar as partículas do óleo [10].

### **2.4.4. Rigidez Dielétrica**

A rigidez dielétrica consiste em medir a tensão de ruptura do óleo. Essa medida é feita através de duas esferas imersas no óleo, separadas por uma distância pré-determinada. Inicia-se aplicando uma diferença de potencial entre as esferas e medindo o maior valor de tensão que não há descarga entre as esferas. O resultado é dado na tensão máxima (kV) aplicável. O valor da rigidez dielétrica é uma medida do grau de impureza do óleo (água, fibras, particulado, etc) [10].

### **2.4.5. Teor De Água**

O teor de água é o ensaio que mede diretamente a quantidade de água presente no OMI. Esse ensaio é feito por meio da oxidação do dióxido de enxofre e medida por um amperímetro [10].



## 2.4.6. Tensão Interfacial

A tensão Interfacial é a medida de força necessária para um anel de platina rompa a interface água-óleo. O valor é dado em mN/m, e esse ensaio medi indiretamente a concentração de compostos polares presentes no óleo [10].

## 2.4.7. Índice De Neutralização

O índice de neutralização, ou o número de neutralização, é o número de miligramas de hidróxido de potássio (KOH) necessário para neutralizar um grama de óleo. Dessa forma, o número total de ácido no óleo isolante é determinado dissolvendo-se certo volume de sua amostra em uma mistura de tolueno e álcool isopropílico e pequena quantidade de água.

## 2.5. Índice De Qualidade Do Sistema (OQIN)

Utilizando os dados dos ensaios físico-químico é possível calcular o índice de qualidade do Sistema(OQIN). Esse parâmetro é calculado dividindo a tensão interfacial (IFT) pelo número de neutralização (NN). A Tabela 2.1 apresenta a classificação do OMI, com base em seu OQIN e sua cor, podendo ser classificados em: Bom, Regular, Ruim, Muito Ruim, Extremamente Ruim e Condições Desastrosas.

**Tabela 2.1:** Classificação do Óleo mineral isolante.

NN	IFT	Cor	OQIN	Classificação
0,00 – 0,10	30,0 – 45,0	Amarelo pálido	300 – 1500	Bom
0,11 – 0,15	24,0 – 27,0	Amarelo claro	160 – 318	Regular
0,16 – 0,40	18,0 – 23,9	âmbar (marrom amarelado)	45 – 159	Ruim
0,41 – 0,65	14,0 – 17,9	Marrom	22 – 44	Muito Ruim
0,66 – 1,50	9,0 – 13,9	Marrom escuro	6 – 21	Extremamente Ruim
1,50 ou mais	--	Preto	--	Condições Desastrosas

Essa classificação (OQIN) tem como objetivo padronizar a qualidade do OMI em quatro parâmetro: a capacidade de refrigeração, proteção contra ataques químicos e prevenção da formação de borra. Na classificação OMI Bom, todas os parâmetros estão em condições perfeitas. A segunda e terceira classificação, OMI Regular e Ruim, os parâmetros de capacidade de refrigeração e proteção contra ataques químicos não estão atuando em sua capacidade máxima, causando danos ao sistema. Na

3, 4 e 5 classificação, a borra se depositou em todo o enrolamento, comprometendo a isolação e reduzindo drasticamente a refrigeração. A última classificação, condições desastrosas, o óleo perdeu todas suas propriedades.

## 2.6. Análise Cromatográfica dos Gases Dissolvidos No OMI.

A análise cromatográfica dos gases dissolvidos no OMI (DGA – *Dissolved Gas Analysis*) é uma ferramenta de detecção e avaliação de falhas em transformadores. Quando uma falha ocorre no transformador, também associado a essa falha há a criação de gases que se dissolveram no óleo. A concentração desses gases está relacionada a um tipo de falha.

Os principais gases utilizados na DGA estão apresentados na Tabela 2.2. Todos os gases estão presentes no óleo em operação normal, como exceção do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que apenas é detectado quando há falhas.

**Tabela 2.2:** Gases utilizados na DGA

Hidrogênio	H <sub>2</sub>
Metano	CH <sub>4</sub>
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Monóxido de Carbono	CO
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>
Oxigênio	O <sub>2</sub>
Nitrogênio	N <sub>2</sub>

Há ocorrência de uma falha no transformador pode gerar uma variação na concentração dos gases dissolvidos. Assim essa variação pode ser um indicador de falha, bem como, indicar qual tipo de falha está ocorrendo. A quantidade de gás liberado depende do tipo e grau de gravidade da falha.

Atualmente, para realizar a DGA com alto grau de confiabilidade são necessários instrumentos de alto grau de precisão, que apenas são encontrados em laboratórios de ponta. O processo de análise pode ser resumido nas seguintes etapas: 1º Envio da amostra de OMI; 2º Extração dos gases do OMI; 3º Análise da mistura de gás extraídos; 4º Interpretação dos dados.

Com bases nos resultados da DGA é possível tomar decisões de contenção e/ou reparação do OMI.



# 3. DETECÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

A análise cromatográfica dos gases dissolvidos em óleo isolante é uma ferramenta que está sendo muito abordada nos últimos anos, tendo resultados que comprovam a determinação de falhas incipientes, e para utilização em monitoramento de equipamento sem interrupções no fornecimento de energia. A formação de gases no óleo mineral isolante dos transformadores pode ocorrer devido ao envelhecimento natural ou, em maior quantidade, por defeito ou falhas no equipamento [11].

Quando uma falha térmica ou elétrica ocorre em uma parte ativa do transformador, a energia liberada quebra as ligações C-C e C-H das moléculas do óleo mineral e são formadas novas moléculas, como hidrocarbonetos e óxidos de carbono. A natureza, concentração, proporção relativa dos gases e evolução da concentração de cada gás traz indícios de qual tipo de falha ocorreu ou está ocorrendo. Atualmente, alguns gases são importantes para o diagnóstico e são utilizados nesta análise. Dentre estes gases, nove são relacionados com determinadas falhas (hidrogênio ( $H_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), etileno ( $C_2H_4$ ) e etano ( $C_2H_6$ )) e dois fornecem informações complementares (oxigênio ( $O_2$ )) e nitrogênio ( $N_2$ )) [12].

Atualmente, existem diversos métodos para determinar o tipo de falha com base nos resultados da análise cromatográfica. Como exemplos podem ser citados os seguintes métodos: Gás Chave, Razão de Roger, Doernenburg, Razão IEC, método IEEE e Triângulo de Durval. Esses métodos comumente usam limites de concentração de gases para inferir o estado do transformador, ou seja, intervalos são utilizados para inferir o diagnóstico [13].

Tendo em vista que uma operação normal também pode gerar gases, a diferenciação entre a operação normal e uma falha incipiente é de grande importância, assim a taxa de geração dos gases vem para tentar discernir entre essas duas possibilidades.

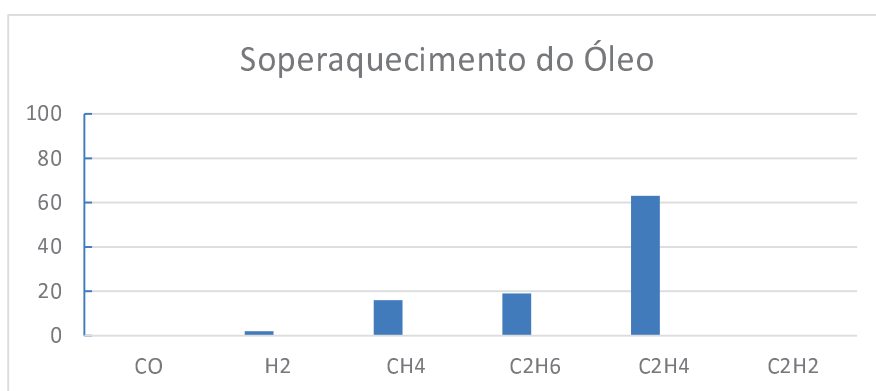
### 3.1. Gás Chave

O método de gás chave deve início nos laboratórios de Doble em meados da década de 70. Esse método tem como principal ferramenta a caracterização de um gás principal para cada tipo de falha. Isso significa que cada falha gera um espectro bem definido de gases gerados predominantes no óleo [14]. Na Tabela 3.1 estão apresentados o gás chave para 4 tipos de falhas.

**Tabela 3.1:** Gás Chave para cada tipo de falha

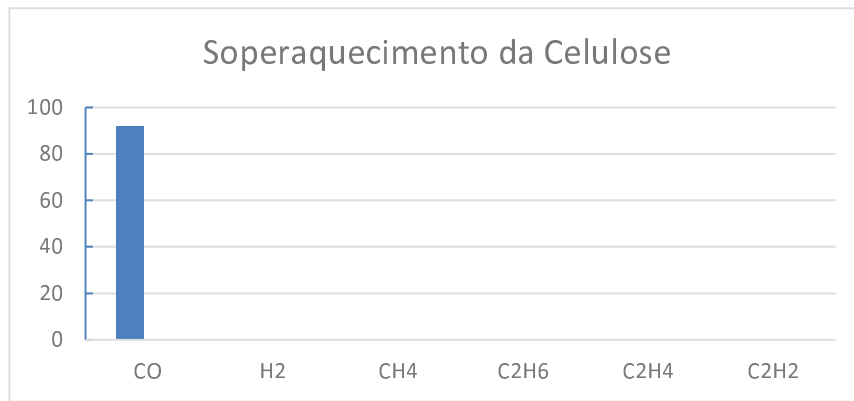
Falha	Gás Chave
Óleo superaquecido	Etileno
Celulose superaquecida	Monóxido de Carbono
Corona	Hidrogênio
Arco	Acetileno

No óleo superaquecido, produtos como o etileno e o metano, junto com pequenas quantidades de hidrogênio e etano são gerados. Traços de acetileno são gerados se essa falta for severa. Gás chave: etileno (Figura 3.1).



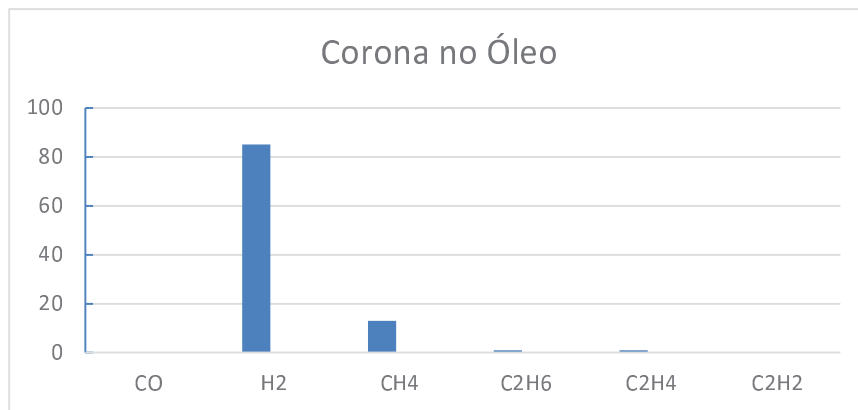
**Figura 3. 1:**Proporção relativa de gás vs. tipos de gases, para o óleo superaquecido

Quando há superaquecimento da celulose, grandes quantidades de dióxido de carbono e monóxido de carbono são geradas. Gás chave: monóxido de carbono (Figura 3.2).



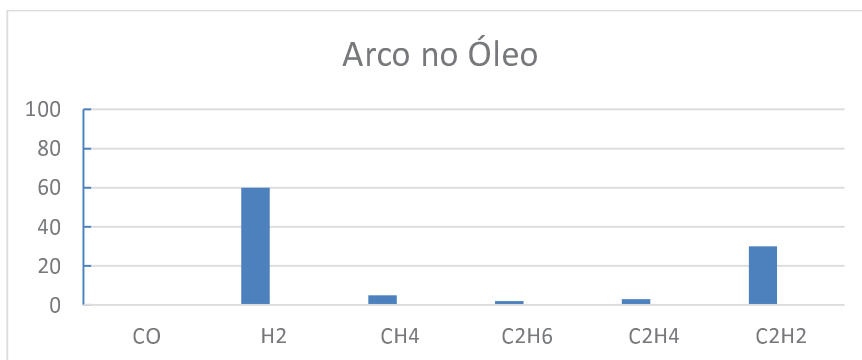
**Figura 3.2:** Proporção relativa de gás vs. tipos de gases, para celulose superaquecida.

Com falhas elétricas do tipo corona, descargas de baixa energia produzem hidrogênio e metano, com pequenas quantidades de etano e etileno. Gás chave: hidrogênio (Figura 3.3).



**Figura 3.3:** Proporção relativa de gás vs. tipos de gases, para falha tipo corona.

Com os arcos elétricos no óleo são produzidas grandes quantidades de hidrogênio e acetileno, com pequenas quantidades de metano e etileno. Gás chave: acetileno (Figura 3.4).



**Figura 3.4:** Proporção relativa de gás vs. tipos de gases, para a falha do tipo arco elétrico.

## 3.2. Método de Doernenburg

Em 1970, Doernenburg diferenciou as falhas de origem elétrica e térmica em um transformador pela comparação de pares de gases com aproximadamente a mesma solubilidade e coeficientes de difusão, como o etileno e o acetileno ou o metano e o hidrogênio. Esse método se tornou promissor porque ele elimina o efeito do volume de óleo no transformador [15] e simplifica a escolha da unidade.

O método de Doernenburg sugere que existem três grandes classes de falhas (térmica, corona e arcos elétricos). Para obter diagnóstico por esse método, há uma sequência de passos [16]:

1º Obter as concentrações dos gases  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$  e  $C_2H_6$ .

2º Se pelo menos um dos gases –  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$  ou  $C_2H_4$  – exceder o dobro do valor limite L1 (Tabela 3.2) e pelo menos um dos outros dois gases exceder o correspondente valor limite L1, então o transformador deve apresentar falhas.

3º Se pelo menos um dos gases de cada razão R1, R2, R3 e R4, onde  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $C_2H_2/CH_4$  e  $C_2H_6/C_2H_2$  são as razões, respectivamente, exceder o limite L1, então o procedimento é válido; caso contrário, outro método deve ser utilizado.

4º Se a análise for válida, as razões R1, R2, R3 e R4 devem ser comparadas com a Tabela 3.2

**Tabela 3.2:** Tabela de concentração dos gases para validação do método de Doernenburg.

Gás Chave	Concentração L1 (ppm)
Hidrogênio ( $H_2$ )	100
Metano ( $CH_4$ )	120
Monóxido de carbono ( $CO$ )	350
Acetileno ( $C_2H_2$ )	35
Etileno ( $C_2H_4$ )	50
Etano ( $C_2H_6$ )	65



**Tabela 3.3:** Tipos de falha pelo método de Doernenburg.

Tipo de falha sugerida	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Decomposição Térmica	>1,0	<0,75	<0,3	>0,4
Corona (baixa intensidade)	<0,1	Sem significância	<0,3	>0,4
Arcos elétricos (alta intensidade)	>0,1 <1,0	>0,75	>0,3	<0,4

### 3.3 Método de Rogers

Por padrões da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), é possível encontrar possíveis falhas nos transformadores com auxílio do método de Rogers. Esse método consiste em analisar as quatro razões: CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Quatro condições são detectáveis: envelhecimento normal, descarga parcial, falhas térmicas e falhas elétricas em vários níveis. O diagnóstico é feito por simples comparação da análise dos gases no óleo com a Tabela 3.4.

**Tabela 3.4:** Tipos de falhas pelo método de Rogers

Falhas	Razões			
	$\text{CH}_4 / \text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_6 / \text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4 / \text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2 / \text{C}_2\text{H}_4$
Normal	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Descargas parciais do tipo corona	$\leq 0,1$	$< 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Superaquecimento para 150°	$\geq 1,0$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$	$< 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Superaquecimento 150 – 200°C	$\geq 1,0$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$	$\geq 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Superaquecimento 200 – 300°C	$> 0,1$ $< 1,0$	$\geq 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Aquecimento dos condutores dos enrolamentos	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 1,0$ $< 3,0$	$< 0,5$
Circulação de corrente nos enrolamentos	$\geq 1,0$ $< 3,0$	$< 1,0$	$\geq 1,0$ $< 3,0$	$< 0,5$
Circulação de corrente elétrica no núcleo ou no tanque	$\geq 1,0$ $< 3,0$	$< 1,0$	$\geq 3,0$	$< 0,5$
Arco elétrico com grande dissipação de energia	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 1,0$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$	$\geq 0,5$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$
Arco elétrico com pequena dissipação de energia	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 0,5$ $< 3,0$
Descarga contínua	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 3,0$	$\geq 3,0$
Descargas parciais corona com tracking	$\leq 0,1$	$< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 0,5$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$

As vantagens de métodos baseados em razões são que eles são quantitativos e independem do volume de óleo no transformador. Entretanto, o método de razões pode produzir interpretações errôneas ou nenhuma. Mas pode ser usado em conjunto com outros métodos de diagnóstico como o do gás chave.

### 3.4 Método IEC

Com a finalidade de identificação de falhas, a CIGRE WG 15-01 (Comitê de Grades Sistemas Elétricos) trabalhou em um banco de dados de amostras com análises cromatográficas e também do tipo de falha do transformador em questão. Experimentos em laboratório foram realizados para verificar a qual faixa de temperatura as razões de gases apresentavam mudanças significativas. Com base nesses dados experimentais e embasamento teórico, os limites para os quais as razões representariam falhas foram alterados em relação ao método de Rogers [17].

Como a razão etano/metano só indicava uma faixa limitada de temperatura de decomposição, mas não auxiliava na identificação de falhas, ela foi descartada. Foi admitido que apenas três razões simplificaria a apresentação, apresentados na Tabela 3.5 e sua classificação na Tabela 3.6.

**Tabela 3.5:** Intervalos da razão de gases para o método IEC

Razão de gases	Intervalo	Código
$C_2H_2/C_2H_4$	<0,1	0
	0,1-1,0	1
	1,0-3,0	1
	>3,0	2
$CH_4/H_2$	<0,1	1
	0,1-1,0	0
	1,0-3,0	2
	>3,0	2
$C_2H_4/C_2H_6$	<0,1	0
	0,1-1,0	0
	1,0-3,0	1
	>3,0	2

**Tabela 3.6:** Tipos de falha pelo método IEC

$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$	Tipo de Falha
0	0	0	Sem falhas
*	1	0	Descarga parcial de baixa densidade de energia
1	1	0	Descarga parcial de alta densidade de energia
1-2	0	1-2	Descarga de baixa energia (faíscas contínuas)
1	0	2	Descarga de alta energia (arcos)
0	0	1	Falha térmica <150°C
0	2	0	Falha térmica 150-300°C
0	2	1	Falha térmica 300-700°C
0	2	2	Falha térmica >700°C

### 3.5 Método IEEE®

O método IEEE pode ser utilizado em transformadores que não foram testados anteriormente ou que não apresentam histórico de testes. Se existe um teste anterior, ele deve ser considerado para verificar a variação dos dados em cada teste, mostrando quais gases são estáveis (não variam significativamente) ou instáveis (variam significativamente) em um dado intervalo.

O método consiste em saber a concentração de gases no OMI e buscar sua condição conforma a Tabela 3.7 e seu significado na Tabela 3.8.

**Tabela 3.7:** Limites de concentração de gases (ppm)

Condição	Hidrogênio H <sub>2</sub>	Metano CH <sub>4</sub>	Acetileno C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Etileno C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etano C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Monóxido de Carbono CO	Dióxido de Carbono CO <sub>2</sub>	TDCG
Condição 1	100	120	35	50	65	350	2500	720
Condição 2	101-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	2500-4000	721-1920
Condição 3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
Condição 4	>1800	>1000	>80	>200	>150	>1400	>10000	>4630

**Tabela 3.8:** Tipos de falha pelo método IEEE®

<b>Condição 1</b>	Índice Total de Gases Combustíveis Dissolvidos (TGCD) abaixo deste nível indica que o transformador está operando corretamente
<b>Condição 2</b>	TGCD neste intervalo indica possível falha. Deve-se retirar amostras frequentes de óleo mineral para determinar o crescimento diário neste índice
<b>Condição 3</b>	TGCD neste intervalo indica nível alto de decomposição de celulose e/ou óleo mineral. Provavelmente há uma falha no transformador
<b>Condição 4</b>	TGCD neste intervalo indica decomposição excessiva de celulose e/ou óleo mineral. Operação contínua pode resultar em falhas do transformador

O método IEEE é bastante conservativo, sendo que os transformadores podem operar com segurança com gases na condição 4 sem problemas, dado que eles estão estáveis; se a concentração dos gases estiver variando significativamente (mais de 30ppm por dia), uma falha deve estar em progresso e o transformador deve ser desligado [15].

### 3.6 Triângulo de Duval

O método de diagnóstico pelo Triângulo de Duval para equipamentos de potência, imersos em óleo isolante foi desenvolvido por Duval em 1974. Esse método é baseado na concentração de

três hidrocarbonetos ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  e  $\text{C}_2\text{H}_2$ ) no óleo. O Triângulo de Duval tem se apresentado confiável e preciso em seus diagnósticos por muitos anos e atualmente está ganhando popularidade [18].

O triângulo de Duval não se aplica à maioria dos transformadores a não ser quando os três gases explosivos citados aparecem juntos, caracterizando um iminente perigo ao equipamento mesmo em concentrações moderadas. O triângulo é traçado utilizando os dados históricos obtidos pela análise de gases dissolvidos no óleo. O tipo de falta é diagnosticado diretamente no gráfico triangular gerado.

Para obter um diagnóstico, é necessário primeiramente consultar outro método para indicar se há falhas no transformador ou não [13]. Para se confirmar a existência de uma falha pela Tabela 3.9, é necessário que pelo menos um dos gases da tabela apresente concentração igual ou superior a L1 e que a geração deste gás no transformador seja superior ao valor indicado por G2.

**Tabela 3.9:** Limite de falha

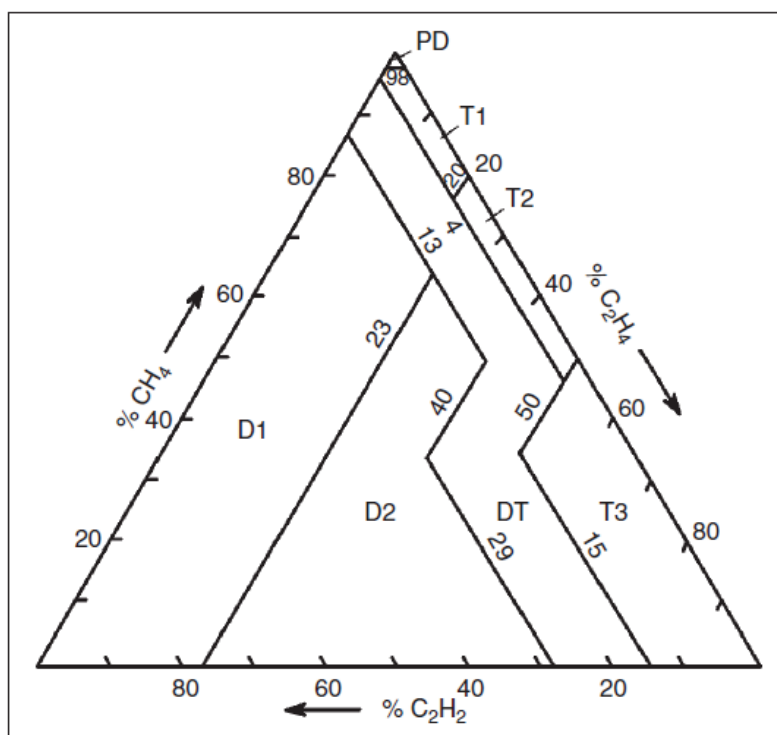
Gás	Limite L1	Limite G2
	(ppm)	(ppm por mês)
$\text{H}_2$	100	50
$\text{CH}_4$	75	38
$\text{C}_2\text{H}_2$	3	3
$\text{C}_2\text{H}_4$	75	38
$\text{C}_2\text{H}_6$	75	38
CO	700	350
$\text{CO}_2$	7000	3500

Confirmada a existência de uma falha, o triângulo de Duval indica o tipo de falha. Para tanto, é necessário avaliar três gases chave:  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Primeiramente, é necessário encontrar a concentração percentual de cada gás, conforme as expressões abaixo:

$$\text{C}_2\text{H}_2[\%] = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4}, \quad \text{CH}_4[\%] = \frac{\text{CH}_4}{\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4}, \quad \text{C}_2\text{H}_4[\%] = \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4}$$

$$[\text{C}_2\text{H}_2] = [\text{CH}_4] = [\text{C}_2\text{H}_4] = \text{ppm}$$

Em seguida, as concentrações percentuais desses três gases devem ser alocadas no triângulo de Duval (Figura 3.5), o que gera um ponto. A região para a qual este ponto pertence indica o tipo de falha do transformador. As falhas são indicadas na Tabela 3.10.



**Figura 3.5:** Triângulo de Duval

**Tabela 3.10:** Tipos de falha pelo Triângulo de Duval

Símbolo	Falha	Exemplos
PD	Descarga parcial	Descargas do tipo corona
D1	Descargas de baixa energia	Descargas parciais com faíscas, induzindo pontos de papel carbonizado e conseqüentemente formação de partículas de carbono no óleo
D2	Descargas de alta energia	Descargas de alta energia no papel e no óleo, resultando em extenso dano ao equipamento e grande quantidade de carbono no óleo, podendo haver fusão no metal
T1	Falha térmica, $T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	Evidenciada pelo papel se tornando marrom ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
T2	Falha térmica, $300 < T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	Carbonização do papel e formação de partículas de carbono no óleo
T3	Falha térmica, $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	Extensa formação de metal no óleo, coloração do metal ( $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ou fusão do metal ( $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
DT	Mistura de falhas	Mistura de falhas elétricas e térmicas no transformador

Os métodos apresentados anteriormente são facilmente computados e dão bons resultados para o diagnóstico para a prevenção ou após a ocorrência de faltas severas em transformadores mas podem ser pouco sensíveis na detecção de faltas. Entretanto são usados como guias para os sistemas inteligentes baseados em inteligência Artificial.





# 4 SISTEMA FUZZY

Em 1965, Lotfi A. Zadeh, apresentou a lógica fuzzy. Ele desenvolveu essa lógica pois tinha em mente que havia uma deficiência das ferramentas para descrever os problemas de natureza industrial, biológica ou química, onde essas possuíssem situações ambíguas. Atendendo a esses casos o Prof. Zadeh publicou em 1965 um trabalho apresentando os conceitos dos conjuntos fuzzy.

A lógica fuzzy trabalha em moldes do raciocínio aproximado, ao invés dos exatos, essa forma de descrever um evento se aproxima muito com a forma de funcionamento do raciocínio humano.

Modelagem e controle utilizando a lógica fuzzy são técnicas para o tratamento de informações qualitativas de uma forma rigorosa. Derivada do conceito de conjuntos fuzzy, a lógica fuzzy constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade de projeto e implementação, tornando-se uma alternativa para a solução de problemas de controle e modelagem de sistemas.

Esta forma de estruturação do raciocínio é capaz de tomar decisões racionais mesmo estando em um ambiente de incertezas e imprecisões, onde dados desta natureza e até mesmo conflitantes são tratados [19]. A tecnologia advinda da teoria de conjuntos fuzzy e da lógica fuzzy tem permitido a aplicação destas técnicas em diversas áreas do conhecimento [20], tendo como exemplos os sistemas fuzzy de controle, os quais podem possibilitar um controle mais acurado, além de um desempenho estável e robusto; ou ainda, na modelagem de sistemas, onde através das técnicas de sistemas de inferência fuzzy é possível uma representação mais fiel do mesmo e inclusive a extração de informações qualitativas deste.

Como mencionado anteriormente, a lógica fuzzy procura expressar o raciocínio aproximado, ou seja, através da representação do conhecimento por regras se pode responder a um determinado estímulo. Na lógica fuzzy existe a opção adicional de se empregar possibilidades linguísticas, como por exemplo “provável”, “altamente provável” e “improvável”, interpretados como números fuzzy e manipulados pela aritmética fuzzy. Também em contraste com a lógica modal clássica, o conceito de possibilidade é interpretado utilizando os subconjuntos fuzzy no universo dos reais.

Através da lógica fuzzy, um sistema pode ser representado através de conceitos imprecisos tais como “rápido”, “baixo” e “pequeno”. Essas propriedades são responsáveis, entre outras, pela facilidade na extração do conhecimento de um sistema a partir de observações realizadas sobre este.

O conjunto fuzzy pode ser definido matematicamente por dotar cada possível indivíduo no universo com um valor representando sua grade de pertinência no conjunto. Esta grade corresponde ao grau com o qual o indivíduo é similar ou compatível com o conceito representado pelo conjunto fuzzy. Indivíduos podem então, pertencer ao conjunto em maior ou menor grau, conforme indicação

de sua função de pertinência. Os valores desta função são frequentemente representados por valores numéricos reais em intervalos entre 0 e 1.

Em um sistema de inferência fuzzy, os valores de entrada são normalizados e convertidos para uma representação fuzzy. Este processo é denominado de fuzzificação das variáveis de entrada. As regras do sistema fuzzy serão executadas em paralelo, conseqüentemente, uma região fuzzy será produzida para cada variável. A criação desta região fuzzy através das regras ativas do sistema é conhecida por agregação. Depois do processamento das regras de inferência, as regiões fuzzy são convertidas em valores não fuzzy, também conhecidas como valores “crisp”, determinando assim, o valor de cada variável de saída do sistema. O processo de se converter tal região fuzzy em um valor real é conhecido por defuzzificação.

### 4.3 Definições Básicas

Seja  $X$  um espaço de objetos e  $x$  um elemento genérico de  $X$ . Um conjunto clássico  $A$ ,  $A \subseteq X$ , é definido como uma coleção de elementos ou objetos  $x \in X$ , tal que cada  $x$  pode pertencer ou não ao conjunto  $A$ . Para definir uma função característica para cada elemento  $x$  em  $X$ , nós podemos representar um conjunto clássico  $A$  por um conjunto de pares ordenados  $(x, 0)$  ou  $(x, 1)$ , os quais indicam  $x \in A$  ou  $x \notin A$ , respectivamente. Como já mencionado anteriormente, um conjunto fuzzy, diferentemente do conjunto clássico acima mencionado, expressa o grau para o qual um elemento pertence a um conjunto. Permite valores entre 0 e 1, os quais denotam o grau de pertinência de um elemento em um dado conjunto.

Definição: Se  $X$ , é uma coleção de objetos, denotados genericamente por  $x$ , então, um conjunto fuzzy  $A$  em  $X$ , é um conjunto de pares ordenados, tal que:

$$A = (x, \mu_A(x)) | x \in X$$

onde:

$A$  : conjunto fuzzy;

$x$  : elemento pertencente ao universo de discurso  $X$ ;

$X$  : universo de discurso;

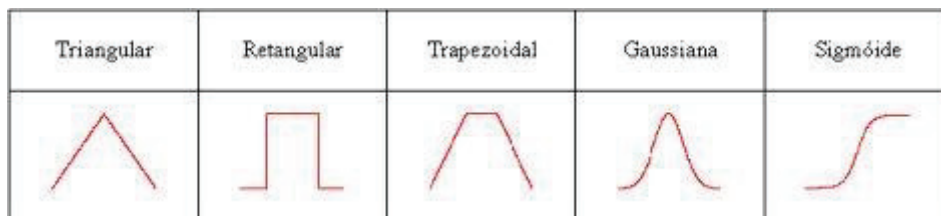
$\mu_A(x)$ : função de pertinência.

Para a construção de um conjunto fuzzy necessita-se da identificação de um universo de discurso e da especificação de uma função apropriada de pertinência. A especificação de funções de pertinência é subjetiva, o que significa que, quando especificadas para um mesmo conceito, por

pessoas diferentes, podem variar consideravelmente. Esta subjetividade vem das diferenças individuais em perceber ou expressar conceitos abstratos e tem pouco a ver com a aleatoriedade.

Na prática, quando o universo de discurso  $X$  é um espaço contínuo, nós usualmente dividimos o conjunto completo  $X$  em vários conjuntos fuzzy. Estes conjuntos, usualmente apresentam nomes que correspondem a adjetivos que aparecem em nosso uso linguístico diário, e também são chamados valores linguísticos ou rótulos linguísticos. Um conjunto fuzzy é unicamente especificado por sua função de pertinência, onde as regras e conclusões serão obtidas em função deste valor, e não mais do valor propriamente dito da grandeza em questão.

A representação destes conjuntos vai depender do tipo da equação escolhida para cada função. As representações mais usuais de conjuntos fuzzy, de acordo com a sua função de pertinência, são mostradas na figura abaixo:



**Figura 4. 1:** Representação das funções de pertinência.

Pode-se notar, pela representação acima, que as do tipo sigmóide, gaussiana, utilizam apenas uma equação para obtenção do grau de pertinência em um determinado universo de discurso. Já a função triangular, vai utilizar duas funções e a trapezoidal e retangular, três equações.

### 4.3.1 Operações com Conjunto Fuzzy

Similarmente à teoria dos conjuntos, e a partir das definições apresentadas até aqui, a lógica fuzzy se desenvolve através da operação entre os conjuntos fuzzy. A seguir são apresentadas as principais operações com conjuntos fuzzy (operações básicas)

- **União**

A união de dois conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$ , resulta em um conjunto fuzzy  $C$  descrito como  $C = A \cup B$  ou  $C = A \text{ OUB } B$ , cuja função de pertinência está relacionada àquelas de  $A$  e  $B$  por:

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

- **Intersecção**

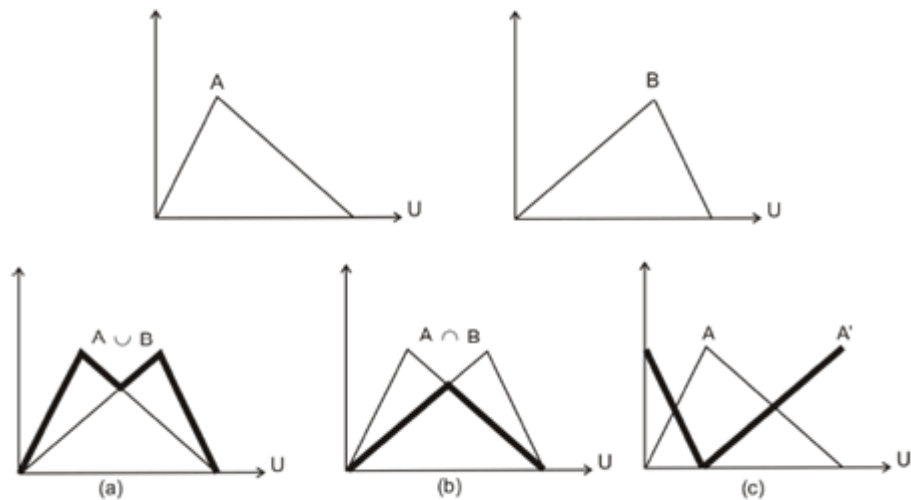
A intersecção de dois conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$ , resulta em um conjunto fuzzy  $C$  descrito como  $C = A \cap B$  ou  $C = A \text{ E } B$ , cuja função de pertinência está relacionada aquelas de  $A$  e  $B$  por:

$$\mu_C(x) = (\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

- **Complemento**

O complemento ou negação do conjunto fuzzy  $A$ , denotado por  $\check{A}$  ou  $N\check{A}OA$ , pode ser entendido como o grau com a qual  $x$  não pertence a  $A$ , e é definido como:

$$\mu_{\check{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$



**Figura 4. 2:** Representação gráfica das operações básicas.(a) adição, (b)intersecção e (c) complemento

Como pode ser visualizado, estas operações são equivalentes às operações de conjuntos clássicos, quando o domínio de funções de pertinência estão restritas ao conjunto  $\{0, 1\}$ .

## 4.4 Aplicações de sistemas inteligentes no diagnóstico de falhas em transformadores

Nesse tópico foi feito uma revisão na literatura sobre a utilização de sistemas inteligentes na detecção de falhas em transformadores.

LIN, LING et al. (1993), utilizaram uma estrutura de lógica fuzzy associada a um sistema especialista no desenvolvimento de uma ferramenta para diagnóstico de falha em transformadores usando análise dos gases dissolvidos no óleo isolante (DGA). Baseado na experiência e em normas, criaram funções de pertinência; primeiro individualmente para cada gás, após, em relação aos limites de proporções de gases e por último em relação ao gás “chave”, e todas estas, função dos valores de

gás gerado. De posse destas curvas de dados, foi criado o sistema especialista para o diagnóstico. As taxas de diagnósticos corretos, em novos casos registrados na literatura, foram de no mínimo 86,7%, obtidas na ocorrência de falha elétrica, chegando a 100% na identificação das condições de normalidade [21].

VARELLA, CHEIM et al. (2000) propuseram uma metodologia que combinasse diversos conjuntos fuzzy, utilizando-se de quatro conjuntos de pertinência. O primeiro, considerando o nível de gás gerado, dependente do histórico do equipamento e de sua família. O segundo levando em consideração o nível de relações gasosas geradas. O terceiro, que, utilizando-se de redes neurais, arbitra uma nota, conforme o grau de importância atribuída a falha e fuzzyfica esta nota em classificadores do tipo: “sem falha”, “falha leve”, “falha importante” e “falha grave”. E o último que, através do julgamento do especialista determina a influência do antecedente no consequente, aumentando ou diminuindo a pertinência dos conjuntos anteriores e fornecendo o diagnóstico final [22].

HUANG, YANG et al. (1997), propuseram um sistema fuzzy aliado a um algoritmo evolucionário. Baseado no método de Rogers, ou seja, trabalhando com três relações de gases, formaram um espaço padrão em três dimensões (uma relação para cada eixo), com conjuntos fuzzy de forma trapezoidal. Denotavam taxas pequenas, médias e grandes. O sistema de diagnóstico fuzzy era composto, assim, por 27 regras fuzzy e ainda 24 pontos da função de pertinência de forma trapezoidal para serem delimitados. Através dos exemplos, formava um padrão para cada tipo de falha. Com dados novos, tentava minimizar a função erro em relação a este padrão utilizando um algoritmo de programação evolucionária [23].

SU, LAI et al. (2000) desenvolveram uma ferramenta de diagnóstico capaz de diagnosticar múltiplas falhas incipientes existentes no transformador. Utilizaram três passos principais para o desenvolvimento do seu método fuzzy. Primeiramente gerando um vetor fuzzy contendo a função de pertinência dos códigos de taxas de gases da IEC, que passaram de representação binária, para graus de pertinência. Segundo, criando um conjunto fuzzy de forma trapezoidal e representaram-nas na forma de um vetor com as respectivas funções de pertinência para cada código: “baixo”, “médio” e “alto”. Finalmente, o último e o mais importante passo no desenvolvimento do sistema especialista, que combinava os vetores anteriormente descritos, atribuindo um peso a cada um deles e formando o vetor fuzzy com o diagnóstico. Vale salientar que os pesos referenciados acima eram determinados pela experiência prévia [24].

Nesse artigo DUKARM et al. (1993) apresenta uma forma de uso de redes neurais de modo um pouco diferente daquele exposto nos artigos anteriores. Ele ressalta alguns pontos interessantes: muitos fatores contribuem para o ruído nos dados obtidos para a análise de gases dissolvidos ou simplesmente DGA, tornando difícil e menos preciso o processo; o diagnóstico é baseado nas

concentrações dos gases predominantes e na sua proporção relativa ao total dos gases combustíveis dissolvidos; sugere um método das razões de Rogers melhorado, simulado por uma rede com três pequenas camadas; lógica fuzzy pode ser utilizada para analisar gases dissolvidos no óleo de transformadores de potência e que embora fiel aos métodos tradicionais melhora o resultado do diagnóstico; em alguns casos as redes neurais podem ser usadas combinadas com lógica fuzzy para implementar métodos de diagnósticos mais complexos [25].

Com bases nesses estudos fica exemplificado a utilização do sistema Fuzzy e redes neurais como ferramenta de diagnóstico de falhas em transformadores, essas técnicas ainda podem ser combinadas com diversos métodos para maior precisão e confiabilidade.

# 5 CONCLUSÃO

O sistema de energia elétrica brasileiro vem crescendo muito nos últimos anos, como consequência o estudo nessa área também vem crescendo. O transformador de potência é uma parte fundamental e de grande valor desse sistema, sendo necessário um constante monitoramento, para melhor a confiabilidade e a qualidade do sistema. O diagnóstico de falhas utilizando a análise de gases dissolvido vem sendo explorada muito nos últimos anos, como solução para o monitoramento de transformadores de potência. As técnicas aqui apresentadas trabalham de forma analítica, sendo fácil sua implementação computacional, mais apresentam a desvantagem de serem rígidos com relação a variações das medidas, da ocorrência de falhas simultâneo, entre outras. Assim a lógica fuzzy se apresenta para complementar tais técnicas, aumentando suas confiabilidades e flexibilidades.





# 6 BIBLIOGRAFIA

---

- [1] Vitor, A. **Sistema de Detecção e Diagnostico de Falhas em Sensores de um Compressor de Gás Natural Utilizando Logica Fuzzy Tipo-2**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Engenharia Industrial, da Universidade Federal da Bahia, 2012
- [2] Acesso em < <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Transformadores/Transformadores-de-Forca>> em 15/07/2014
- [3] Denise, S. **Falhas e Defeitos Ocorridos em Transformadores de Potência do Sistema Elétrico da Celg, nos Últimos 28 Anos: um Estudo de Caso**. Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás/UFG. 2008.
- [4] BIRLASEKARAN, S.; XINGZHOU, Y., FETHERSTONE, F. et al. **Diagnosis and Identification of Transformer Faults from Frequency Response Data**. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2000.
- [5] Duval, M. **A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers**, Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2002.
- [6] LAPWORTH, J.A. **Transformers Reliability Surveys**. Revista Electra, n. 227, p.10-14. august. 2006. Cigré.
- [7] SINGH, S., BANDYOPADHYAY, M. **Dissolved Gas Analysis Technique for Incipient Fault Diagnosis in Power Transformers: A bibliographic survey**, Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2010.
- [8] Roberto, Z **Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral**. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [9] MORAIS, D.R. **Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.
- [10] GRANATO, R. M., TULIO, L. **Manutenção de Transformadores Baseada em Ensaio Físico-Químicos e Cromatográficos no Sistema Isolante**. LACTEC, 2005.
- [11] José, A. **Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência pela Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante Através de Redes Neurais**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação de Ciências em Engenharia da Universidade Federal de Itajubá, 2005.
- [12] PERRIER, C.; MARUGAN, M.; BEROUAL, A. **DGA Comparison Between Ester and Mineral Oils**. 2012.

- 
- [13] MUHAMAD, N. A.; PHUNG, B. T.; BLACKBURN, T. R. **Comparative Study and Analysis of DGA Methods for Mineral Oil Using Fuzzy Logic**.2007
- [14] COMMITTEE, T. IEEE **Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers**, 1991.
- [15] BHALLA, D.; BANSAL, R. K.; GUPTA, H. O. **Transformer Incipient Fault Diagnosis Based on DGA Using Fuzzy Logic**. India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010), 2011.
- [16] IEEE Std C 57. IEEE **Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers**, 1991.
- [17] Rogers, R. R. **Ieee And Iec Codes To Interpret Incipient Faults In Transformers , Using Gas In Oil Analysis**. Electrical Insulation, IEEE Transactions on, v. 1978.
- [18] AKBARI, A. et al. **A Software Implementation of the Duval Triangle Method**. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008
- [19] LEE, C. C. **Fuzzy Logic In Control Systems: Fuzzy Logic Controllers – Part I And II**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990.
- [20] GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R. **Modelagem, Controle, Sistemas E Lógica Fuzzy**. Revista Controle e Automação, 1994.
- [21] LIN, C. E.; LING, J. M.; HUANG, C. L. **An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis**. IEEE Transaction on Power Delivery, 1993.
- [22] VARELLA, V.; CHEIM, L.; DUPONT, C.; 2000. **Sistema de Inferência Fuzzy para Diagnóstico de Transformadores de Potência**. In: VII SEPOPE – Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning. Curitiba – Paraná
- [23] HUANG, Y. C.; YANG, H. T.; HUANG, C. L. **Developing a New Transformer Fault Diagnosis System through Evolutionary Fuzzy Logic**. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997.
- [24] SU, Q.; LAI, L. L.; AUSTIN, P.; 2000. **A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer**. Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Power system Control, Operation and Management, APSCOM 2000.
- [25] DUKARM James J., **Transformer Oil Diagnosis Using Fuzzy Logic and Neural Networks**. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, pp 329-332, 1993.