

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Shigeaki Leite de Lima

*DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO A
TEORIA DA EXTENSÃO*

São Luís

2008

Shigeaki Leite de Lima

*DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO A
TEORIA DA EXTENSÃO*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da UFMA, como requisito para
a obtenção do grau de MESTRE em Engenharia Elétrica.

Oswaldo Ronald Saavedra Mendez, Dr.

(Orientador)

André Nunes de Souza, Dr.

(Co-orientador)

São Luís

2008

Lima, Shigeaki Leite de

Diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência utilizando a teoria da extensão / Shigeaki Leite de Lima - 2008
94f.

Orientador: Osvaldo Ronald Saavedra Mendez

Co-orientador: André Nunes de Souza

Impresso por computador (fotocópia)

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Maranhão, curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, São Luís, 2008.

1.Transformadores de potência. 2.Diagnóstico de falhas. 3.Teoria da extensão. Teoria da extensão I. Mendez, Osvaldo Ronald Saavedra, orient. II. Título.

CDU 621.314.1

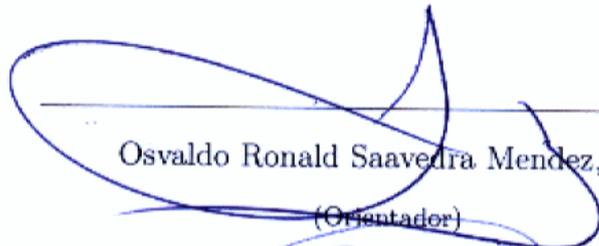
Shigeaki Leite de Lima

*DIAGNÓSTICO DE FALHAS INCIPIENTES EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA UTILIZANDO A
TEORIA DA EXTENSÃO*

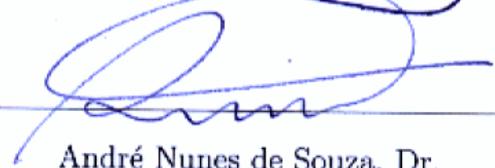
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da UFMA, como requisito para
a obtenção do grau de MESTRE em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 01 de agosto de 2008

BANCA EXAMINADORA



Osvaldo Ronald Saavedra Mendez, Dr.
(Orientador)



André Nunes de Souza, Dr.
(Co-orientador)



Edson Nascimento, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)



José Eduardo Onoda Pessanha, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)

Aos meus pais, irmãos e esposa.

Aos amigos, pelo apoio e companheirismo.

Resumo

Os transformadores de potência cumprem um papel decisivo na continuidade do fornecimento de energia elétrica, obrigando um monitoramento contínuo dos processos que possam provocar falhas de operação, que particularmente ocorrem no isolamento do equipamento. Os métodos previstos na IEC, IEEE e NBR7274 para análise do gás dissolvido (AGD), não alcançam nível pleno de acerto, pois existem situações nas amostras de óleo que geram resultados contraditórios e incompatíveis. A Teoria da Extensão é um método baseado na idéia de que contradições podem ser transformadas em problemas compatíveis. Neste trabalho tal metodologia é aplicada para resolver incompatibilidades encontradas no diagnóstico feito com a NBR7274 (método de Rogers modificado) para detecção de falhas incipientes. O método consiste em modelar a NBR e analisar os resultados quanto ao grau de acerto obtido. Foram feitos testes com vários estudos de caso disponíveis na literatura técnica, mostrando-se bem promissor na identificação das falhas.

Palavras-chave: AGD, Diagnóstico de falhas, Método de Rogers modificado, Teoria da Extensão, Transformadores de potência.

Abstract

Power transformers play an important role in the power energy supply, demanding the continuous monitoring of process that could lead to operation faults, specifically in the equipment electric insulation. Methods considered in the standards IEC, IEEE and NBR7274 for dissolved gas analysis (DGA) do not provide good levels of accuracy, because there are scenarios with oil samples that lead to contradictory evaluations. The extension theory is a method based on the idea that contradiction can be transformed into compatible problems. In this work, this theory is applied for solving incompatibilities found in the application of the standard NBR7274 for incipient detection faults (the modified Roger's Method). In order to validate the approach, several test cases from recent literature have been implemented and included. The approach has shown good comparative performance in the fault identification process.

Keywords: AGD, Fault diagnosis, modified Roger's Method, Extension Theory, Power Transformers.

Agradecimentos

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e compreensão tão necessários para prosseguir em busca dos ideais e realizações.

À minha esposa Tê, que sabe entender as dificuldades de um trabalho acadêmico, dando-me sempre incentivo, motivação e muito amor.

Ao meu orientador e co-orientador, prof. Osvaldo R. Saavedra Mendez e prof. André Nunes de Souza, que dedicaram-me o seu tempo, com extrema paciência e compreensão, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, Nelson José Camelo, José Gomes de Matos e Luís Antonio pelas discussões, debates e descontrações que ajudaram no encaminhamento deste trabalho.

Aos meus demais familiares, tios e tias, primos e primas, sobrinhos e sobrinhas e afilhados, por tentar entender a importância que é a formação acadêmica para mim e pelos sinceros votos de sucesso em todos os momentos.

Aos amigos, Walbermark Marques do Santos e Hugo Baluz Bezerra de Farias, pelo companheirismo e apoio no decorrer destes últimos dois anos (mesmo distante).

Aos amigos que fazem e fizeram o NEA, Carlos Cesar, Fábio Mendes, Silvângela, Cledson, Bartolomeu, Aryfrance, Lino, Newton, João Vitor, Júlio Cesar, Igor, Leal, Luizão, Nara Freitas.

Aos demais amigos, Haimir, Yamada, Ricardo Falcão, Hilberte entre muitos outros que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando e comprovando o valor de uma amizade.

A todas as pessoas que de alguma forma ou de outra, me auxiliaram no decorrer destes dois anos de mestrado.

À Coordenação do curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica, as Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE/MA) e a CAPES pelo apoio financeiro.

“A pessoa que procura segurança no Deus Altíssimo e se abriga na sombra protetora do Todo-Poderoso pode dizer a ele: Ó Senhor Deus, tu és o meu defensor e o meu protetor. Tu és o meu Deus; e eu confio em ti...”

Salmo 91

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	15
2.1 ANÁLISE DA UMIDADE	15
2.2 ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS (AGD)	16
2.3 GRAU DE POLIMERIZAÇÃO	21
2.4 ANÁLISE DO FURANO PELO LCAD	24
2.5 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO	26
3 TEORIA DA EXTENSÃO	27
3.1 TÉCNICAS INTELIGENTES PARA DETECÇÃO DE FALHAS	27
3.1.1 Abordagem Fuzzy	29
3.1.2 Abordagem Neural	30
3.2 TEORIA DA EXTENSÃO	31
3.3 TEORIA DO ELEMENTO MATÉRIA	34
3.4 TEORIA DOS CONJUNTOS EXTENSOS	36
3.4.1 Função de dependência	37
3.5 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO	39
4 TEORIA DA EXTENSÃO APLICADA AO DIAGNÓSTICO DE FALHAS	40

4.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO	43
4.1.1	Geração de saída de processos	48
4.2	ESTUDO DE CASO	49
4.2.1	Amostras obtidas de artigos	49
4.2.2	Base de dados IEC TC10	58
4.2.3	Amostra de AGD da ELETRONORTE-MA	65
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO PROPOSTO	73
4.4	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO	74
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS	75
5.1	CONCLUSÕES	75
5.2	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	APÊNDICE	85
	ANEXO	87

LISTA DE FIGURAS

2.1	Triângulo de Duval	20
2.2	Cromatografia CPG	23
3.1	Norma-triangular adaptada de [46]	29
3.2	Entrada gases e saída tipo de falha	30
3.3	Domínios de um conjunto extenso	37
3.4	Função de dependência adaptada de [63]	39
4.1	Diagrama de implementação do método	43
4.2	FRE do primeiro tipo de intervalo adaptada de [64]	45
4.3	FRE do segundo tipo de intervalo	46
4.4	FRE do terceiro tipo de intervalo	46
4.5	Algoritmo implementado	47
4.6	Gráfico de falhas 1	51
4.7	Temperatura dos gases adaptada de [67]	54
4.8	Gráfico de falhas 2	56
4.9	Gráfico de falhas (corona)	59
4.10	Gráfico de falhas (arco)	60
4.11	Gráfico de falhas (temperatura)	64
4.12	Gráfico de falhas do autotransformador Fase A	68
4.13	Histórico de gases do transformador Fase A	69
4.14	Gráfico de falhas do autotransformador Fase B	71
4.15	Histórico de gases do transformador Fase B	72

LISTA DE TABELAS

2.1	Concentração de gases dissolvidos	19
3.1	Comparação entre os conjuntos	34
4.1	Definição de códigos do método Rogers	41
4.2	Classificação das falhas	41
4.3	Elemento matéria para AGD	44
4.4	Comparação dos resultados 1	50
4.5	Comparação dos resultados 2	55
4.6	Descarga parcial de energia (corona)	58
4.7	Descarga parcial de energia (arco)	61
4.8	Falha térmica de média temperatura	63
4.9	Amostra de gases do transformador Fase A	66
4.10	Amostra de gases do transformador Fase B	70

1 INTRODUÇÃO

As empresas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica confiam fortemente que a infra-estrutura existente (linhas, transformadores, compensadores, FACTS, etc.) possa permitir o fornecimento seguro de energia aos consumidores. Porém, no caso da América do Norte e Europa estes sistemas são antigos e conseqüentemente a confiabilidade do suprimento de energia pode estar seriamente comprometida, pois um grande número de equipamentos ainda em operação estão próximos do fim da vida útil projetada ou já a ultrapassaram. Em algumas concessionárias, mais de 40 % dos transformadores de potência já superaram 40 anos de operação e a substituição desses equipamentos acaba sendo adiada devido à falta de orçamento e de equipes de trabalho [1].

Uma tendência mundial é o uso otimizado dos equipamentos elevando ao máximo as capacidades de operação, em alguns casos ultrapassando os valores limites. Desta forma, muitas empresas têm concentrado esforços para o desenvolvimento de métodos que assegurem a extensão da vida útil desses equipamentos, principalmente de transformadores. Para este último, por exemplo, uma solução é a utilização de equipamentos para a purificação do óleo que pode ser feita com o transformador em operação e as análises laboratoriais, associadas à utilização de *softwares* e aquisição de dados em tempo real para a determinação da perda de vida, sobrecarregamento e falhas de operação.

No caso do Brasil, com a reestruturação do setor, o Sistema Elétrico opera de forma interligada. Assim, o sistema de transmissão torna-se ainda mais importante, uma vez que, além do serviço básico de transmissão de energia, todos os integrantes do Sistema Interligado devem ter livre acesso à Rede Básica.

Neste sentido, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa nº 191 de 12 de dezembro de 2005 [2] que estabelece os procedimentos para a determinação da capacidade operativa das instalações de transmissão integrantes a rede básica, das demais instalações de transmissão e dos componentes do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O número de transformadores de potência instalados no SIN representa um percentual bastante significativo na matriz energética nacional. A função destes equipa-

mentos no Sistema Elétrico de Potência (SEP) está diretamente relacionado às grandes extensões (geração e carga) como um meio de diminuir ao máximo as perdas de transmissão. Assim, devido à grande importância de um transformador no sistema elétrico, a perda total ou parcial de um equipamento por falha ou redução de perda de vida representa custos excessivos à empresa de energia, tanto pelo fato de não poder entregar potência às unidades consumidoras como pelas multas que podem ser aplicadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) pela indisponibilidade do serviço.

As empresas podem, no caso de constatação de perda de vida útil, devido a sobrecarregamento imposto pelo ONS, exigir o pagamento de adicional financeiro prescrito na Resolução Normativa no 513 de 16 de setembro de 2002 [3], desde que o transformador esteja operando dentro dos critérios e condições de carregamento indicados na Norma Brasileira NBR 5416 de julho de 1997 [4]. Contudo, respeitar as condições de carregamento descritos na Norma e pleitear o adicional financeiro exige um comprometimento ainda maior das empresas em monitorar e diagnosticar frequentemente qualquer alteração que coloque em risco ou comprometa a operação do equipamento.

Nos últimos dez anos têm ocorrido com frequência a perda parcial ou total de subestações devido à explosão de transformadores. Só nos EUA foram identificadas 730 explosões entre 2001 e 2008, com uma projeção de aumento de 2 % ao ano [5]. No Brasil, ainda em abril de 2008 foram confirmadas duas explosões em subestações no Estado de São Paulo. As causas podem estar relacionadas à redução de investimento no setor de geração, transmissão e distribuição de energia ou podem ter sido decorrentes da competitividade do mercado elétrico que exige uma maior durabilidade e uma maior produção, resultando assim, em envelhecimento acelerado e sobrecarga dos transformadores.

Para os Gestores de Risco e Companhias de Seguros, o transformador é um dos equipamentos de mais alto risco de falha dentro de uma usina de energia elétrica, devido à grande quantidade de óleo que fica em contato com elementos submetidos à alta tensão. Portanto, é necessário que as concessionárias tenham acompanhamento contínuo dos processos de operação e manutenção, para poder diagnosticar as possíveis situações que possam provocar falhas de operação, que particularmente ocorrem no isolamento do equipamento. Isto gera uma necessidade de estudar formas que permitam estender a vida de um transformador ou pelo menos manter a vida útil para o qual foi projetado.

Para diagnosticar possíveis efeitos que levam a falhas de operação é necessário compreender os fenômenos físico-químicos que ocorrem no transformador em situações normais ou quando submetidos à sobrecargas excessivas. O sistema de isolamento de grande parte dos transformadores de potência consiste basicamente, de óleo, composto de hidrocarboneto e de papel. Muitos dos transformadores conectados a rede elétrica estão se aproximando do final da vida útil projetada, devido, principalmente, à degradação da isolamento, pois os materiais isolantes dos quais são fabricados os transformadores entram em processo de degradação em função de temperaturas de operação elevadas e da presença de oxigênio e umidade.

Para poder acompanhar e diagnosticar a degradação da isolamento nos transformadores, existem técnicas clássicas, utilizadas para fazer a análise da umidade no óleo do transformador, do gás dissolvido (AGD)[6], do grau de polimerização (GP) e do Furano¹ pelo líquido cromatográfico de alto desempenho (LCAD).

Posteriormente, foram incorporadas outras técnicas e modificações a partir de metodologias já existentes como por exemplo, a substituição de estudos baseados no peso molecular que apontam medidas da viscosidade, pela técnica de cromatografia de permeação de gel, considerada como sendo mais útil do que o método da viscosidade, uma vez que fornece informação sobre a mudança do peso e da distribuição molecular [34]. Já a espectroscopia fotoelétrica de raios-X (XPS) inclui informações sobre o estado químico dos elementos, a variação da composição química com a profundidade e a variação da composição química espacialmente na superfície e na “largura” das camadas.

A espectroscopia pode ser aplicada utilizando as regiões do ultravioleta ao infravermelho. Um diagnóstico feito pela espectroscopia do ultravioleta visível (UV) pode detectar a mudança na coloração do óleo decorrente da oxidação. A espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) são utilizadas quando se deseja caracterizar o envelhecimento da celulose com o objetivo de se avaliar a condição da isolamento do papel [36].

Recentemente, novos métodos de diagnósticos têm sido desenvolvidos, devido à evolução tecnológica que possibilita o uso de uma moderna instrumentação, computadores de última geração, *softwares*, etc. Estes novos métodos são baseados tanto nas medidas de polarização no domínio do tempo quanto no da frequência. Medidas no domínio do tempo

¹Composto químico formado em função da degradação da celulose do papel isolante.

ganharam importância significativa nos últimos dez anos (1998) [9] e são realizadas a partir de medidas de corrente de polarização/despolarização e da tensão de retorno. Medidas no domínio da frequência são realizadas aplicando uma tensão senoidal em uma amostra, de forma que a amplitude e a fase do fluxo da corrente possam determinar uma constante dielétrica [10].

Existem ainda métodos alternativos de diagnóstico da condição de isolamento de transformadores que podem ser encontrados na literatura internacional. Todavia o uso desses métodos, na maioria dos casos, está voltado para situações particulares ou no caso em que se trabalha com transformadores desenergizados (*off-line*). Conseqüentemente esses métodos não são abordados, uma vez que se trata de técnicas invasivas. Em muitos casos é inviável para uma concessionária a desconexão de uma unidade transformadora para análise da condição de isolamento. Para resolver este problema, aplicam-se técnicas que produzem resultados indiretos, a partir das análises físico-químicos e da cromatografia de gases.

Um método de diagnóstico amplamente utilizado é a análise do gás dissolvido (AGD). A interpretação dos resultados pode ser feita através da Norma IEC 605 (1999) que utiliza uma relação de códigos e pela Norma IEEE 57.104 (1991) que utiliza os métodos de Doernenburg e Rogers. A revisão da Norma Brasileira NBR 7274 (1999) sugere o uso de Rogers com um formato similar a IEEE 57.104 com poucas variações. Tanto os métodos previstos na IEC quanto no IEEE e NBR são aplicados à detecção de falhas em transformadores, porém o nível de acerto não é pleno, pois existem situações em que o método não consegue fornecer um resultado, ou seja, não indica o tipo da falha, devido às incompatibilidades encontradas na amostra do gás.

Há vários trabalhos em que foram aplicadas técnicas inteligentes tais como redes neurais, lógica *fuzzy*, sistemas neuro-fuzzy, conjuntos *rough*, mineração de dados, algoritmos evolutivos, entre outras, para realizar o AGD em uma amostra de gás, como em [11], [12], [13] e [14]. Não obstante, a metodologia sempre é um pouco complexa, difícil de ser implementada computacionalmente e os resultados são comprometidos quando a variável da incompatibilidade e contradição faz-se presente.

Uma nova abordagem para resolver este problema está na Teoria da Extensão, também chamada de *Extenics* - por caracterizar uma matemática subjetiva - que é um método que se baseia na idéia de que contradições podem ser transformadas em problemas

compatíveis. Esta teoria é composta pelo elemento matéria e pelo conjunto extenso, sendo que o elemento matéria funciona como a célula lógica que modela as incompatibilidades do sistema. A metodologia tem sido utilizada com sucesso na detecção de falhas em vários domínios da engenharia [15][16].

Neste trabalho é apresentado o conceito da matemática de extensão para resolver problemas incompatíveis encontrados quando é aplicada a NBR7274 (1999) para diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência, ou seja, falhas que ainda não ocorreram, mas que podem progredir para um quadro de falhas no transformador. A metodologia foi validada com vários estudos de caso disponíveis na literatura técnica, mostrando-se promissora na identificação das falhas. Os testes realizados corroboram o potencial da metodologia, que está sendo aplicada a um estudo de caso real com uma unidade das Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE/ MA).

Esta Dissertação está organizada como segue: no Capítulo 2 são abordadas as técnicas convencionais de avaliação da condição de isolamento em transformadores de potência. No Capítulo 3 é apresentada uma revisão das técnicas inteligentes aplicadas à detecção de falhas e uma introdução à Teoria da Extensão, com a decomposição em teoria do elemento matéria e teoria dos conjuntos extenso. No Capítulo 4 é aplicado o método proposto através do desenvolvimento, estruturação e aplicação de um algoritmo utilizando dados para testes existente na literatura (artigos e Normas) e um estudo de caso com unidades em operação. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para próximos trabalhos.

2 TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Neste Capítulo são apresentadas algumas técnicas de avaliação da condição de isolamento de transformadores de potência, como a análise da umidade no óleo do transformador, a análise do gás dissolvido (AGD), a medida do grau de polimerização e a análise do Furano pelo líquido cromatográfico de alto desempenho (LCAD).

2.1 ANÁLISE DA UMIDADE

A umidade é um fator importante na avaliação da condição de isolamento, pois os materiais isolantes na presença de umidade tendem a absorver água, tendo como resultado o aumento da condutividade elétrica e o fator de dissipação, reduzindo a força elétrica de coesão das partículas do papel isolante.

A umidade pode ser encontrada nos óleos isolantes na forma de solução, estado de emulsão ou em dispersão grosseira. No primeiro caso, a umidade só se torna solúvel no óleo em decorrência de três aspectos: composição do óleo, temperatura e pressão. Ao atingir a saturação, a quantidade excedente de água pode mudar do estado de solução para a forma de emulsão (para partículas de dimensões inferiores a $1 \mu\text{m}$). No estado de emulsão, como as partículas de umidade formadas possuem pequenas dimensões, não ocorre a precipitação devido às forças de tensão superficial e viscosidade do óleo. Quando as partículas formadas possuem dimensões maiores, a água se encontra em uma dispersão grosseira e ocorre a precipitação em forma de gotículas [17].

A solubilidade da umidade depende da composição química do óleo quando novo e do estado de degradação quando em uso. Outra maneira de expressar o teor de umidade no óleo isolante é através do conceito da solubilidade relativa, que é considerada

freqüentemente como umidade relativa do óleo [18]. A solubilidade relativa é dada pela relação entre o teor de umidade existente no óleo em uma determinada temperatura e o valor do teor umidade da máxima solubilidade para a mesma temperatura. Nos últimos anos a aplicação deste conceito vem ocorrendo de forma mais intensa, em parte pela própria tecnologia de medição e por permitir uma melhor visualização das correlações entre as variáveis envolvidas e comportamentos que envolvem a saturação, isto é, a passagem da umidade para o estado de água livre na solução.

Atualmente existem vários métodos de medição direta de umidade, como por exemplo a utilização de um filme fino capacitivo como sensor de umidade e que apresenta bons resultados em condições variadas de temperatura ambiente. A técnica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é bastante eficiente para detectar pequenas mudanças na umidade contida no papel isolante e também para determinar a umidade contida no papel impregnado por óleo [19][20]. Um grande número de técnicas de diagnósticos baseados no dielétrico também estão em uso como ferramenta de análise indireta da umidade do sistema de isolamento óleo-papel.

A finalidade de existirem vários métodos diretos ou indiretos de diagnóstico da umidade decorre da necessidade de manter a unidade transformadora em operação, pois a umidade é um catalizador das reações químicas que podem ocorrer e prejudicar o isolamento do transformador. Além dos cuidados necessários refletidos em processos de manutenção periódicas, existem equipamentos que utilizam filtros de coalescência¹ para realizar a secagem do óleo (eliminação da umidade) com o transformador energizado. Isto tem sido uma forma razoável adotada por muitas empresas de energia a fim de manterem as unidades em operação [21].

2.2 ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS (AGD)

A análise dos gases dissolvidos no óleo isolante é uma técnica bastante utilizada e permite determinar a condição de operação do isolamento, identificando as eventuais falhas que podem ocorrer ou que estão em processo inicial de formação (falhas incipientes). Normalmente as causas estão relacionadas ao sobrequecimento do material isolante ou da ocorrência de descargas elétricas internas geradas a partir da formação de gases, denomi-

¹junção de duas ou mais gotas de um líquido que se encontra disperso numa emulsão.

nados de gases de falha. Estes gases são produzidos em função da degradação do óleo do transformador e do material isolante, sendo o primeiro indício de mau funcionamento do equipamento [22].

Os gases gerados devido às descargas de baixa energia, de alta energia e sobreaquecimento, e que levam à decomposição do material isolantes, provocam a formação de gases caracterizados como combustíveis e não combustíveis que tendem a se manter dissolvidos no óleo. Um transformador que não foi submetido a nenhum tipo de análise de gás, pode ao longo dos anos ter sido submetido a várias perturbações decorrendo a formação de grandes quantidades de gases combustíveis, o que representa um grande risco para a operação [23].

Os principais *gases de falha* gerados a partir da operação do transformador são do tipo hidrocarbonetos (metano CH_4 , etano C_2H_6 , etileno C_2H_4 , acetileno C_2H_2), hidrogênio (H_2) e óxidos de carbono (CO e CO_2). Existem ainda traços de outros gases formados durante o processo de operação e são classificados como *gases não-falha*, como o nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) [24].

Os primeiros trabalhos relacionados nessa área foram voltados para estabelecer uma relação entre o tipo do gás e a severidade da falha apresentada. Normalmente, as causas de gases de falha são classificadas como sendo de origem térmica (sobreaquecimento) ou elétrica (corona e arco). Porém, o processo de falha também está relacionado com as temperaturas esperadas no óleo em função das perturbações que o equipamento esteja submetido (sobrecargas, transitórios, etc) [17].

Portanto, a ocorrência de sobreaquecimento no isolamento provoca a elevação da temperatura do óleo a valores que variam em função da severidade. Da mesma forma, a ruptura da rigidez dielétrica do óleo, dependendo da intensidade das descargas internas, pode ser associada com as temperaturas de formação de arco. Assim, podem ser estabelecidas faixas de temperatura para as quais existe a maior probabilidade de uma ocorrência, de forma que falhas específicas que apresentam uma certa intensidade possam ser reconhecidas dentro de faixas de temperatura. Por exemplo, falhas de origem elétrica, do tipo descargas contínuas ou arco elétrico, podem levar a temperatura do óleo no local onde ocorreu a descarga a níveis próximos dos 1800 °C, o que implica na formação de acetileno (C_2H_2) [25].

Existem outras relações entre temperatura e formação de gases que podem ser citadas. Por exemplo, para temperaturas entre 150 °C e 400 °C os gases mais significativos são os de baixo peso molecular como o hidrogênio (H_2) e o metano (CH_4), sendo que na maioria dos casos existem concentrações mais elevadas de metano. Todavia, se houver uma pequena variação de temperatura, a concentração de hidrogênio pode se tornar superior a do metano. Portanto, a relação entre os dois gases será totalmente alterada. Esta relação entre os dois gases é importante para determinar falhas térmicas de baixa intensidade [26].

Estas relações entre gases em proporções definidas pelas variações de temperatura são a base da metodologia de análise e diagnóstico da condição de isolamento para detecção de falhas em transformadores que utilizam o sistema papel-óleo. Portanto, os métodos de diagnóstico do óleo mais utilizados, em função da presença de gases são:

- IEEE 57.104 (1991) [23];
 - Método Doernenburg;
 - Método de Rogers;
- IEC 605 (1999) [27]; e
- Triângulo de Duval.

Os métodos para diagnóstico do óleo apresentam relações entre os gases e estas relações determinam uma condição do estado do isolamento. No padrão IEEE 57.104 (1991) são realizadas duas relações baseadas nos cinco gases, onde:

- Relação 1: CH_4/H_2 ;
- Relação 2: C_2H_2/C_2H_4 ;
- Relação 3: C_2H_2/CH_4 ;
- Relação 4: C_2H_6/C_2H_2 ; e
- Relação 5: C_2H_4/C_2H_6 ;

Tanto o método de Doernenburg quanto o método de Rogers utilizam relações entre os gases gerados, todavia, existe uma variação entre o números de relações abordadas

em cada método. O método da relação de Doernenburg é aplicado nos casos em que há um aumento significativo na geração de cada gás, de forma que as relações 1, 2, 3 e 4 possam ser comparadas com os valores limites (Tabela 2.1) para que se possa indicar um possível diagnóstico de falha. Já o método da relação de Rogers utiliza apenas três relações entre gases (Relação 1, 2 e 5) para indicar um diagnóstico. Este dois métodos são melhor abordados na IEEE 57.104 (1991), e em alguns casos, tanto o método de Doernenburg quanto o de Rogers podem fornecer um resultado que esteja fora dos padrões de diagnósticos. Neste caso, outros métodos analíticos que envolvam a concentração total de gases dissolvidos devem ser usados a fim de garantir um resultado satisfatório.

Tabela 2.1: Concentração de gases dissolvidos

Gás	Concentração (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

Com a publicação da IEC 605 (1999) e o banco de dados IEC TC 10 foi possível realizar novas interpretações da análise do gás no óleo [28] e com isso possibilitar melhorias nos resultados dos diagnósticos, através de cinco diferentes tipos de falhas. As principais relações de gases têm sido aplicadas para diagnósticos com novos limites de códigos e os gases adicionais indicados para especificar os casos de falhas. Outras definições mais precisas de concentrações normais ou de alarme são destacadas, pois estas falhas podem ser identificadas por inspeção visual do equipamento depois da falha ter ocorrido em operação.

Os exemplos discutidos na IEC 605 (1999) ou IEC 60599 são para os casos em que ocorreram as seguintes condições:

- Descargas parciais;
- Descargas de pouca energia;
- Descargas de grande energia;

- Falhas térmicas abaixo de 300 °C; e
- Falhas térmicas abaixo de 700 °C.

Na IEC 60599 foram apresentados os cálculos dos valores típicos de concentrações de gases, os valores alarmantes (máximos aceitáveis) e taxas típicas de aumento de gás nos transformadores de potência. Além disso, foram introduzidas duas relações adicionais (C_2H_2/H_2 e O_2/N_2) para casos de diagnósticos específicos. A primeira relação é recomendada para detectar possíveis contaminações relacionadas à comutação em carga e a segunda relação para detectar aquecimento e oxidação anormal do óleo.

O triângulo de Duval foi proposto como uma representação para diagnósticos de falhas, para ser aplicado em casos de AGD que não podiam ser resolvidos por intermédio dos códigos IEEE e IEC [29]. De acordo com este método, altas taxas de degradação do papel ocorrem quando a concentração de etileno aumenta fortemente e a relação de CO_2/CO diminui abaixo de 6 (Fig. 2.1). Para uma situação em que a relação de CO_2/CO fica abaixo de 2, a probabilidade de falhas aumenta significativamente quando a concentração de gás combustível excede 200 ppm.

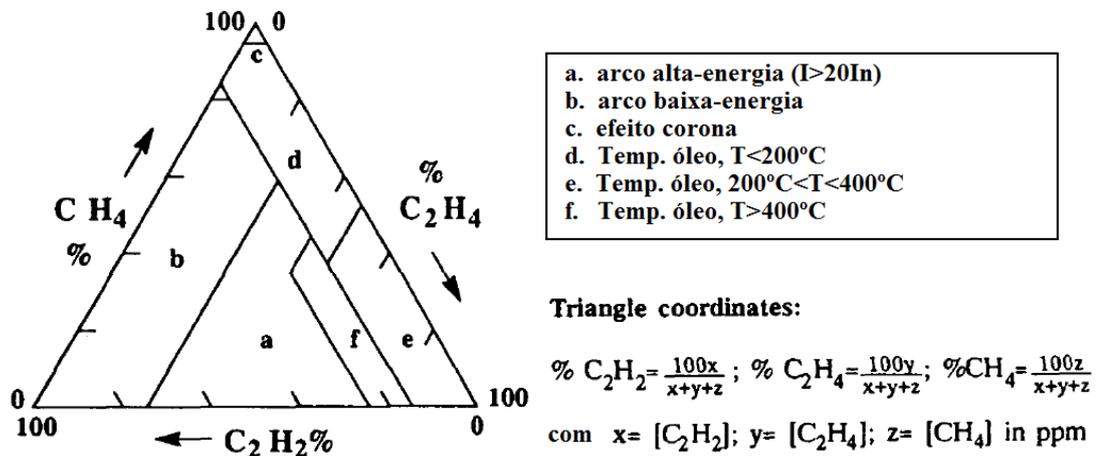


Figura 2.1: Triângulo de Duval

Uma outra abordagem foi proposta para análise do AGD usando método do gás-chave, onde as proporções relativas dos seis gases combustíveis CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , H_2 e CO são apresentadas na forma de gráfico de barras para ilustrar o comportamento do gás [30]. O aspecto inovador desta abordagem permite ser usado para investigar e ilustrar a clara diferença que existe entre os resultados “normais” e “anormais”.

2.3 GRAU DE POLIMERIZAÇÃO

O papel isolante usado em transformadores é basicamente composto de celulose vegetal. Este material, celulose e derivados, possui boas propriedades mecânicas devido a natureza fibrosa e polimérica. Estas características permitem a utilização da celulose como um bom isolante.

A quantidade de celulose existente no papel isolante é medida através do grau médio de polimerização, sendo que o grau de polimerização (GP) é representado pelo número de monômeros² no polímero. O comprimento da cadeia celulósica, medido pela média do grau de polimerização através do método da viscosidade é chamado de GPv [31].

O valor associado a um GPv medido é utilizado como ferramenta de diagnóstico para determinar a condição da isolação de transformadores. Dentre os materiais isolantes utilizados, o papel *Kraft* é o mais aplicado, tendo em média, uma cadeia com comprimento de 1000 a 1500. Porém, depois de um longo período de operação a altas temperaturas e com grande teor de água e oxigênio, o papel se torna frágil, muda a sua cor para marrom escuro e o GPv diminui para 200 a 250. A resistência mecânica do papel *Kraft* com um GPv de 150 a 200 pode ser reduzida a 20 % do valor inicial e este ponto é observado como um critério do final de vida para a isolação do transformador [32].

Para casos em que o GPv medido está entre 900 a 500, a resistência do papel é praticamente constante, mas na faixa de 500 a 200, a resistência diminui em uma proporção direta à diminuição do GPv. A maioria dos trabalhos publicados adota como critério para o fim de vida do papel, quando a resistência mecânica atinge 50 % do valor original, ou seja, com um grau de polimerização de 250 - 200. Nestes casos é padrão se levantar uma curva de resistência térmica para prever o tempo de vida restante da isolação do papel e assim acompanhar freqüentemente o processo de degradação do papel [32].

Os vários estudos realizados reportam diferentes pontos de níveis de GPv para representar o fim de vida do papel, sendo os valores mais utilizados entre 200 - 100, porém, um termo comum abordado é que o envelhecimento do papel está relacionado com o aumento da temperatura. As investigações experimentais feitas para determinar

²Os monômeros são hidrocarbonetos derivados do petróleo.

o envelhecimento térmico do papel *Kraft* sugerem que o GPv começa a diminuir a 120 °C e progride mais rapidamente com o aumento da temperatura, sendo que para uma temperatura de 180 °C o GPv encontrado indicaria o fim da vida do isolante [33].

Em (2.1) é apresentada uma taxa de reação do GPv que relaciona o número de ligações de cadeias não quebradas disponíveis. Isto permite plotar um gráfico de $\log(k)$ em função da temperatura absoluta que relaciona a taxa de reação constante (k) com a temperatura de Arrhenius (t). Através do gráfico $\log(k) \times t$ é possível observar que a energia de ativação permanece constante sob uma grande variedade de condições experimentais. Substituindo valores iniciais e finais de GPv por 1000 e 200, respectivamente, e combinando com (2.2), é possível determinar a equação para o tempo de vida restante do transformador, conforme apresentado em (2.3).

$$\frac{1}{GP_{vt}} + \frac{1}{GP_{vo}} = k.t \quad (2.1)$$

onde:

$GP_{vt} = GP_v$ no tempo t ;

$GP_{vo} = GP_v$ inicial; e

$k =$ constante.

$$k = A.e^{-\frac{E}{R(T+273)}} \quad (2.2)$$

Em que:

$T =$ temperatura em Celsius;

$R =$ constante de gás igual a 8,314 J mol/°K;

$E =$ energia de ativação; e

$A =$ constante que depende das condições de operação.

$$Tempo_{restante} = \frac{0,0004}{A} e^{-\frac{E}{R(T+273)}} (horas) \quad (2.3)$$

As técnicas atualmente mais promissoras estão relacionadas a obtenção do peso molecular através de Cromatografia de Permeação de Gel (CPG). Os resultados obtidos mostraram-se adequados quando empregados ao papel *Kraft*, particularmente em

casos onde a distribuição do peso molecular muda significativamente quando a degradação aumenta.

O CPG é o modo mais conveniente de se obter uma distribuição de peso molecular detalhada para um polímero. Como o CPG fornece toda a distribuição do polímero, qualquer pequena mudança no peso molecular durante o processo de envelhecimento do material isolante é facilmente observada através do cromatograma. No processo de determinação da medida do peso molecular, a celulose nas amostras de papel passa por um processo de purificação, então é submetida à análise da distribuição do peso molecular por cromatografia de permeação de gel, em temperatura ambiente. Na Fig. 2.2 é apresentado um cromatograma CPG com as distribuições do peso molecular de um papel novo e um papel de um transformador com 25 anos de operação [34].

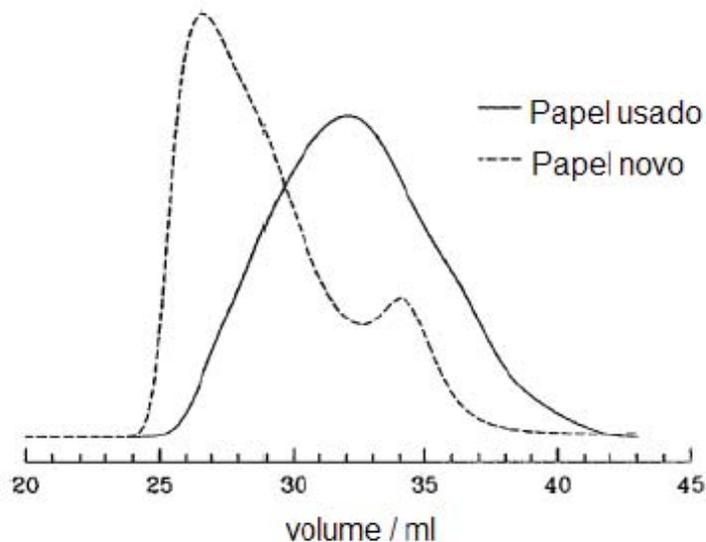


Figura 2.2: Cromatografia CPG

De acordo com o cromatograma (Fig. 2.2), quando o papel atinge 25 anos de operação, o pico do peso molecular é reduzido significativamente e o formato do gráfico também muda. Isto foi evidenciado em outros cromatogramas de papel isolante de transformadores envelhecidos, no qual o peso molecular da celulose diminui em função do tempo de operação. Medidas de CPG também foram realizadas para investigar o envelhecimento oxidativo e térmico em condições controladas de envelhecimento acelerado e foi notado como sendo muito sensível ao envelhecimento [35].

Em comparação com o uso do GPV, o CPG tem potencial para fornecer análises detalhadas das mudanças da distribuição do peso molecular durante o envelhecimento da

celulose, podendo fornecer a base para modelos mais sofisticados de degradação, uma vez que mais situações complexas podem ser contempladas [36].

2.4 ANÁLISE DO FURANO PELO LCAD

O Furano³ é um produto da degradação do papel isolante, sendo encontrado no óleo isolante de transformadores em operação. A análise de furano oferece um método mais conveniente de análise do que a medida direta no papel isolante.

A observação da formação de 2-furfuraldeído (2-FAL) durante a degradação da celulose de papéis isolantes é conhecida há algumas décadas. Este conhecimento resultou na descoberta de uma relação quase logarítmica entre o 2-FAL e o GPv do papel [37], o que possibilitou que várias análises fossem feitas baseadas nessa técnica.

A primeira aplicação da técnica de Cromatografia de Líquidos de Alto Desempenho (HPLC - High Performance Liquid Chromatography) para monitorar a formação de componentes de furano durante o envelhecimento do papel isolante foi aplicada a temperaturas de 20 °C, 80 °C e 110 °C e os resultados apresentaram uma relação entre a força tensora do papel com a concentração de 2-FAL [38], ou seja, pode-se observar que a diminuição da força tensora do papel estava relacionada a um aumento da concentração de furano no óleo.

A equação (2.4) representa um modelo cinético da concentração de furano no óleo do transformador. Esta concentração cresce em forma de uma parábola decorrente da degradação da isolação em função do tempo de operação do transformador.

$$F_t = A(N_c)_0t + \frac{Akt^2}{2} = b.t + c.t^2 \quad (2.4)$$

Em que:

N_c = n° de cadeia de celulose por kg do papel em um tempo t ;

A = constante de proporcionalidade;

k = constante de taxa;

$b = A(N_c)_0$; e

$c = 9Ak/2$.

³Composto orgânico heterocíclico e aromático formado a partir da destilação da celulose, C_4H_4O .

Os componentes de furano que estão presentes no óleo em concentrações maiores são: o 5-hidroximetil-2-furfuraldeído (HMF) e 2-furfuraldeído (F), porém a presença de 2-furfuraldeído é maior que a dos outros furanos e a principal produção ocorre quando o GPv cai abaixo de 400. Quando o GPv se aproxima do ponto crítico de 200, o papel perde toda a resistência mecânica e torna-se susceptível a dano. Os níveis de furano são geralmente menores que 0,1 *ppm* e estes níveis podem ser mantidos por toda a vida útil do transformador. Entretanto, em muitas unidades mais velhas, os níveis variaram entre 1 *ppm* até 10 *ppm*.

Na norma IEC 61198 1993-09 [39] é descrito um método para teste do furano, mas não há procedimentos para as interpretações. É estabelecido por meio de (2.5) uma relação linear entre a concentração de furano em escala logarítmica e o grau de polimerização. À medida que foi obtido um número consistente de amostras do furano foi possível introduzir novas expressões como em (2.6) e (2.7) que estabelecem uma relação entre o furfural e o GPv.

$$\log(F) = 1.51 - 0.0035(GPv) \quad (2.5)$$

Em que:

F = concentração de furfuraldeído em mg/L.

$$GPv = \frac{7100}{8.88 + FFA} \quad (2.6)$$

$$GPv = \frac{800}{(0.186FFA) + 1} \quad (2.7)$$

Em que:

FFA = concentração de furano expressa em mg/kg de óleo.

A equação da taxa de reação química de Dakin ($K_0 = A.e^{\frac{B}{T}}$) é a mais amplamente utilizada na medição de degradação térmica da isolação do transformador. Onde K_0 é a constante da taxa de reação e A , B são constantes empíricas e T é a temperatura em Kelvin.

Este conjunto de técnicas abordadas para a avaliação da condição de isolamento de transformadores de potência permitem conhecer com maior exatidão o número de variáveis que está submetido o equipamento, sendo que o estudo dessas variáveis possibilita um resultado mais elaborado para compor uma solução de diagnóstico. A utilização de um ou vários desses métodos está relacionada com as necessidades imediatas de análise e custos que cada empresa pode assumir, assim pode-se optar por uma análise menos complexa, porém com um bom grau de eficiência para diagnósticos rápidos como é o AGD, onde o controle das variáveis (gases-chave) garantem que não haja falhas de operação do equipamento.

2.5 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas convencionais de avaliação da condição de isolamento em transformadores de potência com o uso dos métodos mais utilizados e que propiciam os melhores resultados no diagnóstico. Discutiu-se sobre a participação da umidade na contaminação do conjunto óleo-papel, a utilização da análise do gás dissolvido no óleo para determinação de uma condição de falha, bem como do grau de polimerização para determinação da vida útil da celulose. Foi comentado sobre a formação dos compostos heterocíclicos (furfural) como um método que pode ser combinado com o grau de polimerização para a detecção com maior precisão das condições do isolamento, já que o furfural é formado quando ocorre degradação da celulose.

Entre os métodos supracitados optou-se nesta Dissertação por trabalhar com a análise dos gases dissolvidos no óleo. Um dos critérios adotados para esta escolha foi o uso desse método nas concessionárias do setor elétrico nacional e internacional. No caso das concessionárias brasileiras, estas dispõem dos recursos necessários para a aplicação deste estudo, com bases de dados de ensaios de cromatografia de gases para diversos equipamentos como transformadores, reatores, buchas, disjuntores entre outros que utilizam óleo mineral como isolante.

No próximo Capítulo é abordado um novo método de diagnóstico para detecção de falhas incipientes usando a Teoria da Extensão que utiliza inteligência artificial e teoria de conjuntos, de forma a precisar uma solução para os casos em que durante a análise do AGD ocorrem situações de incompatibilidade ou contradição.

3 TEORIA DA EXTENSÃO

Antes de abordar especificamente a Teoria da Extensão e desdobramentos que corroboram a validade da técnica é necessário contextualizar sobre a utilização de técnicas inteligentes que são usadas com o AGD na detecção de falhas incipientes, focalizando os problemas e as formas que essas técnicas sozinhas ou agrupadas tentam solucionar, uma vez que o AGD pode ser melhorado ou aperfeiçoado, tanto pela Norma, com a análise dos parâmetros pré-definidos, quanto pela confiabilidade dos dados da cromatografia de gases, da análise de erros de medição, entre outros fatores que podem ser abordados.

3.1 TÉCNICAS INTELIGENTES PARA DETECÇÃO DE FALHAS

As técnicas inteligentes são em grande parte um aperfeiçoamento das técnicas convencionais utilizando Inteligência Artificial (IA) como um catalisador que ajuda a reduzir a sensibilidade aos processos de amostragem na análise de gases.

Existe na literatura um grande número de trabalhos que utilizam técnicas inteligentes, tanto para o diagnóstico do isolamento de equipamentos a partir dos dados de gases dissolvidos no óleo, quanto integradas a outros dispositivos como relés diferenciais [40] e comutadores de tensão sob carga (OLTC - On Load Tap Changer) [41]. Muitos são os fatores que contribuíram para o uso da IA ao problema da detecção de falhas. Pode-se citar, a facilidade de integração de várias informações e dados diferentes, a quantidade de informações referentes ao monitoramento on-line dos equipamentos em operação e a necessidade de avaliação do estado de um equipamento em função da importância estratégica.

Dentre as técnicas inteligentes conhecidas, sistemas especialistas, lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais são as que têm sido mais utilizadas, tanto de forma individual, quanto associadas, a fim de formar sistemas neuro-fuzzy ou sistemas especialistas combinados com lógica *fuzzy* [42].

Os sistemas especialistas de uma maneira geral utilizam os critérios de diagnóstico tradicionais (técnicas convencionais) para a formação da base de regras, além de incorporar algumas regras provenientes de um especialista humano. Podem conter ainda, dados referentes aos modelos de cada equipamento e utilizar esses dados na análise final, sugerindo recomendações de intervenção ou reamostragens.

As redes neurais já vêm sendo usadas em aplicações onde o reconhecimento de padrões é necessário, pois são adaptativas, capazes de tratar com relações não lineares e também para generalizar soluções para um novo conjunto de dados. Seguindo estas características, o processo de detecção de falhas incipientes em transformadores usando redes neurais pode ser implementado na forma de entradas (concentrações de gases) e uma saída (tipo de falha) [43].

O uso de sistemas de diagnóstico baseados em conjuntos nebulosos (*fuzzy*) tem como vantagem reduzir a sensibilidade aos processos de amostragem e análise dos gases. Os sistemas *fuzzy* podem incorporar informações históricas da evolução dos dados de geração de gases e utilizar esses dados no processo de diagnóstico, além de poder trabalhar com as incertezas existentes, como por exemplo, erros dos dados de medição, obtendo conclusões que métodos convencionais não teriam sucesso [25].

Os trabalhos mais recentes publicados nessa área têm sido orientados para a análise de gases dissolvidos no óleo (AGD), sendo que os resultados têm convergido em dois sentidos: o primeiro voltado para determinação de falhas incipientes, cujo o objetivo principal é impedir que uma evolução de gases cause a perda de uma unidade transformadora; e a segunda direcionada a perda de vida útil que depende das propriedades físico-químicas do conjunto óleo-papel.

Uma extensa revisão bibliográfica foi realizada a fim de selecionar os trabalhos mais recentes e os focos abordados. Os resultados da pesquisa foram organizados pela relevância, sendo que abordam as categorias redes neurais e *fuzzy*, com comentários sobre outras técnicas inteligentes aplicadas em AGD.

3.1.1 Abordagem Fuzzy

O uso dos conjuntos nebulosos (*fuzzy*) tenta fornecer ao sistema uma maior sensibilidade nas respostas de análise e diagnóstico, desta forma podem ser fortemente aplicados ao tratamento de incertezas.

Os trabalhos que envolvem essa abordagem em grande parte estão focalizados na obtenção do diagnóstico a partir das normas IEC e IEEE (tabela de códigos), estabelecendo que essas tabelas apresentam desvantagens, pois os limites para a relação dos três gases em alguns pontos se cruzam e geram incertezas quanto ao tipo de falha, desta forma não permitem a determinação de falhas múltiplas [44] [45]. Portanto, a aplicação da lógica fuzzy na remodelagem desses parâmetros pode permitir uma representação mais real da determinação dos limites e do local onde a falha se inicia efetivamente. Na Fig. 3.1 é apresentado o uso de uma norma-t para representar a relação entre gases normalizados, sendo modelados por quatro triângulos que representam os limites específicos de cada gás e os pontos comuns de cruzamento onde as fronteiras se sobrepõem e geram as incertezas.

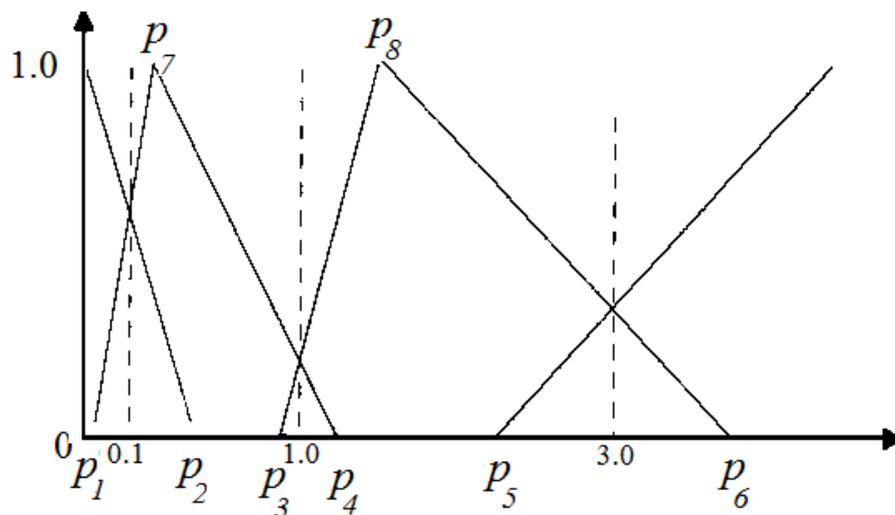


Figura 3.1: Norma-triangular adaptada de [46]

Contudo, alguns cuidados devem ser considerados na elaboração de um sistema de diagnóstico *fuzzy*. O primeiro passo está em decidir quais variáveis de estado representativas do sistema dinâmico devem levar os sinais de entrada do controle. Além disso, escolher as próprias variáveis lingüísticas que formarão o sistema de controle *fuzzy*, pois estas decisões influenciam na qualidade do controle e no aumento do tempo computacional [47].

Em geral, pode-se dizer que a aplicação de sistemas *fuzzy* nos trabalhos encontrados na literatura atual, estão voltados a formar a base de regras e utilizar as variáveis lingüísticas e normas-t em conjunto com outras técnicas inteligentes ou convencionais, de modo a melhorar ou propor uma nova série de códigos (novos domínios) para a relação de gases usado nas normas IEC e IEEE, com a finalidade de resolver o problema das falhas múltiplas.

3.1.2 Abordagem Neural

As redes neurais em geral são aplicadas no reconhecimento de padrões, em relações não lineares e para generalizar soluções. Pois, apresentam uma capacidade de mapeamento das relações não lineares entre a entrada e saída podendo aprender e adaptar-se em modelos estatísticos e distribuídos, extraindo informações de uma entrada sem que haja a necessidade de um modelo físico.

Assim, as redes neurais são também utilizadas para a detecção de falhas incipientes em transformadores, no qual as entradas podem ser os códigos dos gases (IEC, IEEE) representados por X_1, X_2 a X_n e a saída o tipo de falha, Y_1 (Fig. 3.2) [48].

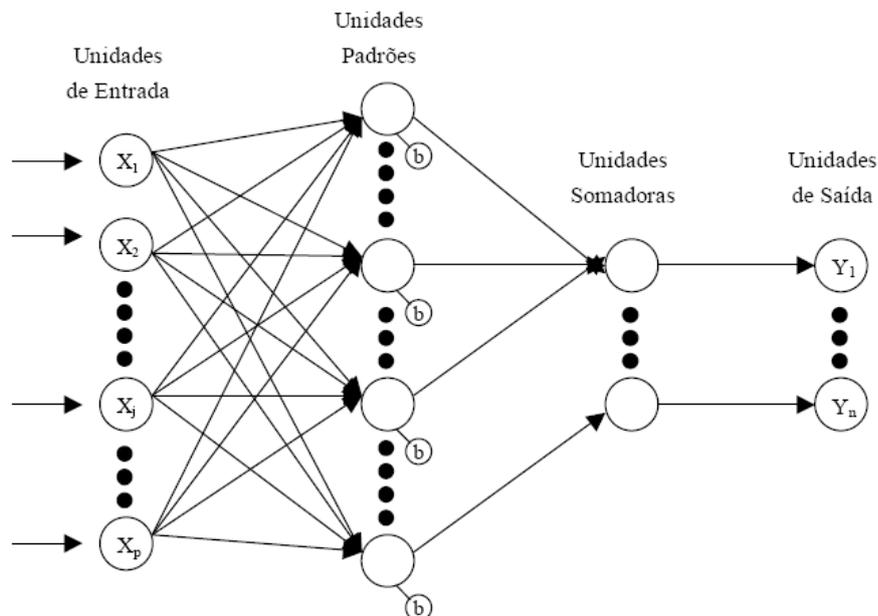


Figura 3.2: Entrada gases e saída tipo de falha

Nesta abordagem, os trabalhos relacionados a diagnóstico de falhas tendem a serem aplicados no desenvolvimento de classificadores que utilizam as análises dos dados de

AGD para determinar as condições de falhas incipientes [49], em aplicações que envolvem a associação de um conjunto de gases e a saída o tipo da falha e em aplicações para o monitoramento das condições de isolamento do equipamento [50] que é um reflexo do diagnóstico feito com o AGD para a determinação da falha.

Demais aplicações envolvem a utilização de outras técnicas inteligentes para o mapeamento das regras de inferência dentro da rede neural durante o processo de treinamento e aprendizado [51]. Com este processo de auto-aprendizado um novo conhecimento é adquirido, e isto resulta numa melhor seleção das variáveis que irão compor a nova base de regras e que serão utilizadas para formar o diagnóstico.

Nos últimos anos os trabalhos mais recentes envolvem uma junção de várias técnicas inteligentes, unindo *fuzzy* e redes neurais (neuro-fuzzy), algoritmos evolutivos e redes neurais, mineração de dados, sistemas especialistas, redes bayesianas, etc.. Esta evolução das técnicas inteligentes aplicado a AGD, está também relacionada com o avanço computacional, melhoria de *softwares* para simulação e programação, equipamentos de última geração e pelo lado das empresas de energia a digitalização de dados, aquisição em tempo real, uso de sondas e formação de base de dados de análise de óleo. Tudo isso tem ajudado significativamente no avanço dos diagnósticos, na precisão dos resultados e no uso de novas técnicas menos conhecidas como o caso da teoria da extensão.

3.2 TEORIA DA EXTENSÃO

O surgimento de novos conceitos matemáticos conduzem a um importante desenvolvimento em ciências aplicadas e áreas técnicas. As teorias de controle clássico como sistemas de controle linear/não-linear, teorias de controle ótimo e adaptativo são baseadas na teoria de conjuntos clássicos. O ponto principal desta teoria é que um elemento pode pertencer ou não a um certo conjunto. Contudo, quando a classificação de um elemento dentro do conjunto é descrito quantitativamente, o resultado pode ser um número qualquer 0 ou 1. Assim, com o objetivo de modelar os dados imprecisos e que tem papel fundamental na habilidade humana de tomada de decisões, L.A. Zadeh (1965) [52] publicou o artigo “Conjuntos nebulosos”. Porém, não esperava que este novo conceito fosse abranger outros ramos teóricos e ser utilizado em dispositivos de uso diário, como em máquinas de lavar, fornos de microondas, câmeras digitais, refrigeradores, automóveis, etc..

Os conjuntos clássicos são baseados em matemática clássica e representam uma teoria funcional dividida em dois problemas (interno e externo). O problema interno vem principalmente do paradoxo de Russell [53] que prova que a teoria dos conjuntos clássicos é contraditória. O problema externo, impõe que o conjunto clássico não pode descrever as características nebulosas da matéria. Esta limitação na teoria clássica fez com que muitas situações de natureza nebulosa não fosse tratadas através dos conjuntos clássicos.

A função de pertinência de um conjunto nebuloso permite que vários elementos do conjunto sejam combinados entre si. O valor da função de pertinência é o grau de certeza que um elemento pertence a um conjunto de pontos. Quando os valores das funções de pertinência de cada ponto são diferentes de zero, os valores serão enumerados ou claramente divididos em dois grupos e os limites do conjunto são determinados [54].

Na lógica nebulosa não é possível transferir um elemento com valor da função de pertinência zero de um conjunto para outro, ou seja, para um conjunto de pontos diferentes de zero. Já na Teoria da Extensão esta mudança é possível fazendo com que os elementos de um conjunto possam ter propriedades qualitativas. Onde o valor associado a qualidade do elemento é mais importante do que o número que este representa dentro do conjunto.

Os conjuntos clássicos, nebulosos e extensos possuem particularidades aplicáveis a cada tipo e complexidade de problemas. Nos conjuntos clássicos é descrito um determinado conceito sobre “sim” ou “não” para aplicações no mundo real através de uma lógica formal. Nos conjuntos nebulosos é feito o uso da lógica nebulosa para estudar a relação e o grau de afinidade entre os elementos. Na Teoria da Extensão é usada a lógica de extensão para compreender e tratar como ocorre a variação dos elementos dentro de um conjunto em função de condições externas. Isto através de uma descrição qualitativa é determinado o quanto uma solução realmente é verdadeira ou falsa e os procedimentos de variação entre a condição verdadeira para falsa ou vice-versa.

A Teoria da Extensão, também chamada de “*Extenics*” [55] - para caracterizar uma matemática subjetiva - é um conceito matemático que foi desenvolvido pelo prof. Cai Wen do Instituto de Tecnologia Guangdong (China) em 1983.

Esta teoria é baseada na idéia de que as “contradições” podem ser transformadas em problemas compatíveis (que apresentam solução). Desta forma podem-se estudar como ocorrem as mudanças de contradições/incompatibilidade nos elementos en-

volvidos e tornar visíveis os mecanismos internos, as leis e as transformações que regem esses elementos.

A Teoria da Extensão é formada de duas principais teorias: teoria do elemento matéria e teoria de conjuntos extensos, sendo que o elemento matéria funciona como a célula lógica que modela as incompatibilidades do sistema e os conjuntos extensos o domínio onde esses elementos são distribuídos por grau de variação.

O conceito de elemento matéria faz a combinação de medidas com características diferentes que revela uma ligação interna dos elementos permitindo descrever as mudanças que ocorrem entre o qualitativo e o quantitativo. Desta forma, o modelo de problemas não compatíveis é descrito por essas mudanças e é feito por meio da célula lógica que é a matemática de extensão. Isto significa que o elemento matéria tem comprovação científica e uma lógica objetiva para descrever a matéria [56].

Os conjuntos extensos são construídos baseados nos conjuntos clássicos e nebulosos, mas com diferenças essenciais:

- 1) a Teoria da Extensão estuda os problemas contraditórios, enquanto os conjuntos clássicos e nebulosos contornam este tipo de problema;
- 2) os conjuntos clássicos e nebulosos estudam somente as relações quantitativas da matéria, diretamente ou atribuindo um grau de pertinência. Mas no conjuntos extensos as características desses elementos podem ser combinadas gerando um resultado mais completo;
- 3) os elementos de um conjunto extenso não são constantes e possuem uma estrutura interna que pode mudar tanto no elemento quanto na estrutura;
- 4) é destacado nos conjuntos clássicos e nebulosos a relação entre todos os conceitos necessários para caracterizar o conjunto. Na Teoria da Extensão apenas as relações das condições necessárias e suficientes para resolver o problema são explicitadas.

Na Tabela 3.1 é apresentado a diferença essencial entre a matemática clássica, nebulosa e de extensão [57].

Tabela 3.1: Comparação entre os conjuntos

Conjunto	clássico	nebuloso	extenso
Modelo	matemático	nebuloso	elemento matéria
Função	transferência	pertinência	dependência
Propriedade	precisão	ambiguidade	extensão
Variação	$C_a(x) \in \{0,1\}$	$\mu_a(x) \in [0, 1]$	$K_a(x) \in (-\infty, \infty)$

3.3 TEORIA DO ELEMENTO MATÉRIA

A Teoria da Extensão introduz o conceito de “elemento matéria”, o qual combina quantitativo e qualitativo e pode ser definido através do grupo de três elementos: $R=(N,c,v)$. No qual, N é o nome do elemento matéria (objeto), c é a característica da matéria e v é o valor da característica (quantidade), assim, N , c , v são chamados de três elementos fundamentais da teoria de elemento matéria e refletem a relação entre qualitativo e quantitativo de um objeto N qualquer. Caso o objeto tenha mais de uma característica (n-dimensões) pode ser representado como indicado em (3.1).

$$R = \begin{pmatrix} N & c1 & v1 \\ & c2 & v2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c3 & v3 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Quando um objeto é dinâmico ou uma característica dinâmica deve ser estudada, o elemento matéria dinâmico deverá ser definido como $R=(N(t),c,v(t))$, onde é expressa a variação do elemento matéria dinâmico em função do tempo [58].

O ponto-chave para se tratar os problemas que envolvem contradições está principalmente no estudo da natureza do elemento matéria. Pois, para se aplicar o método é preciso entender as características de difusão, conjugação, interação, implicação e a capacidade de extensão de um elemento.

A característica de *difusão* do elemento matéria pode ser de três tipos: o primeiro é que define como um conjunto com muitas características (c), onde $N=(N,c,v)=\{(N, c_1, v_1), (N, c_2, v_2), \dots, (N, c_n, v_n)\}$, $c_i \in C$ e $v_i \in V$, por exemplo, se $N=homem$, $c_1=peso$, $c_2=idade$ e $c_3=altura$ seriam as características associadas ao elemento matéria “homem”.

O segundo caso é usado quando se pretende associar uma única característica (c) a muitos objetos (N), podendo ser escrito na forma, $N=(N,c,v)=\{(N_1, c, v_1), (N_2, c, v_2), \dots, (N_n, c, v_n)\}$, $N_i \in N$ e $v_i \in V$, onde $N_1=homem$, $N_2 = mulher$ e $N_3=criança$ são os objetos para a característica $c=idade$.

No terceiro tipo de difusão existem vários valores (v) para uma característica do mesmo objeto, ou seja, $N=(N,c,v(t))=(N, c, v(t_1)), (N, c, v(t_2)), \dots, (N, c, v(t_n))$, $t_i \in T$, por exemplo, $N=homem$, $c=peso$ e $v=[50-70]$, onde o valor correspondente a característica $idade$ varia de 50 a 70 kg.

Já a característica de *conjugação* do elemento matéria ocorre com a definição de domínio para números complexos. Para um dado objeto N , na forma complexa deverá ser escrito como $N=ReN \oplus ImN$, onde ReN é a parte real e ImN a parte imaginária. Assim, para o elemento matéria complexo haveria dois lados para serem avaliados. A parte real por si só já seria o resultado e a parte imaginária seria a qualidade e a confiabilidade referente ao resultado.

A característica de *interação* do elemento matéria ocorre quando existe uma dependência interativa entre os objetos e o valor da matéria. Portanto, para um dado elemento matéria R , todos os objetos e características relativos à dependência interativa formarão uma rede de dependência. A variação do valor de uma característica de um objeto da rede, pode gerar uma mudança no valor da mesma característica de um outro objeto que faz parte da rede.

Outra característica do elemento matéria é a *implicação*. Se A existe então B certamente existe, isto é chamado de A implica B ($A \rightarrow B$). A relação entre A e B é chamada de implicação. Por fim, a característica de extensão do elemento matéria permite descrever a combinação, decomposição e capacidade de substituição entre diferentes objetos.

Este conjunto de características supracitadas (difusão, conjugação, interação, implicação e extensão) descrevem o conceito de extensibilidade do elemento matéria, transformação em objeto, característica do objeto e valor da característica, por isso devem ser especialmente projetados para poder serem aplicados, pois um erro nos cálculos pode mascarar o valor e a qualidade do objeto.

Portanto, a extensibilidade do elemento matéria é o ponto de partida para o desenvolvimento de métodos que ajudam na resolução de problemas práticos através de

uma série de transformações e cálculos básicos. As transformações são representadas por: substituição, resolução, adição/subtração e extensão. Os cálculos básicos envolvem os operadores: e, ou, multiplicação e inversão.

Para concluir o entendimento sobre o elemento matéria foram adicionadas as restrições de superioridade, de verdadeiro e falso e de compatibilidade [59] apresentadas em ANEXO.

3.4 TEORIA DOS CONJUNTOS EXTENSOS

Os conjuntos extensos são a base para a solução de problemas que envolvem elementos de contradição e/ou incompatibilidade e tem sido usado em um grande número de aplicações devido principalmente a capacidade de trabalhar com situações dinâmicas através do uso da função de dependência [60].

Definição: seja U o conjunto universo do discurso; k é um mapeamento de U para o universo dos números reais; então:

$$\tilde{A} = \{(u, y) \mid u \in U, y = k(u)\} \quad (3.2)$$

Esta expressão (3.2) é denominada de conjunto extenso de U , no qual $k(u)$ é o coeficiente relacional de \tilde{A} e y o grau de dependência de u em \tilde{A} . Nas equações (3.3), (3.4) e (3.5) são apresentados os domínios positivos, negativos e o limite zero que formam um conjunto extenso. Estes domínios são apresentados na Fig. 3.3 através do conjunto de domínios aceitáveis (positivo, A) e domínio dos parcialmente aceitáveis e dos desnecessários (negativo, A' e \bar{A}) respectivamente [61].

$$A = \{u \mid u \in U, k(u) \geq 0\} \quad (3.3)$$

$$\bar{A} = \{u \mid u \in U, k(u) \leq 0\} \quad (3.4)$$

O limite zero $J_0(\tilde{A})$ é a intercessão entre os dois conjuntos A e A' dado por:

$$J_0(\tilde{A}) = \{u \mid u \in U, k(u) = 0\} \quad (3.5)$$

Certamente, se $u \in$ ao limite zero $J_0(\tilde{A})$ implica que $u \in A$ e $u \in \bar{A}$. Logo, se representarmos $E(A)$ como o agrupamento de todos os conjuntos extensos de u , então $\tilde{A} \in E(A)$.

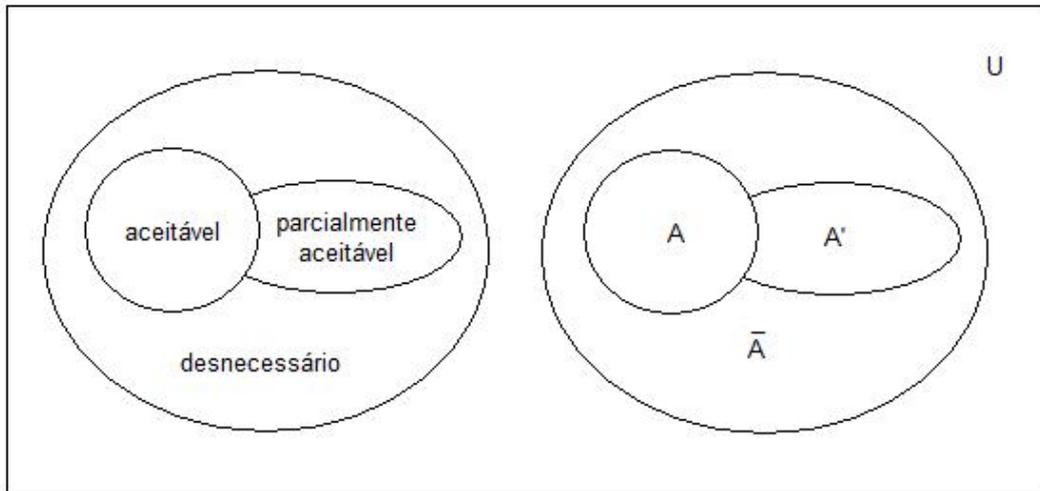


Figura 3.3: Domínios de um conjunto extenso

3.4.1 Função de dependência

O grau de conflito em problemas de grandes dimensões é medido pelo grau de qualidade do objeto referente a um certo valor numérico. Existem valores que às vezes podem ser ou não ser numéricos. Estes valores não numéricos devem ser transformados em um número que os represente, para que possa ocorrer uma relação entre o objeto e os valores a serem estudados através da teoria de conjuntos extensos.

Os conjuntos extensos são representados por uma função de relação ou dependência que deverá ser estabelecida para que existam possíveis soluções em problemas de grandes dimensões. Para isso é necessário observar algumas características destas funções, como: conceito de distância, posição do ponto e dependência [62].

Na matemática clássica a definição da distância entre dois pontos x e y é dada como em (3.6):

$$\rho(x, y) = |x - y| = d \quad (3.6)$$

Supondo que x seja um ponto qualquer no domínio real $(-\infty, \infty)$ e $X_0 = (a, b)$ um intervalo qualquer pertencente ao mesmo domínio, então a distância entre o ponto x e o intervalo X_0 é definido em (3.7).

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \left(\frac{b-a}{2} \right) \quad (3.7)$$

Quando o ponto existe dentro do intervalo, a distância entre ambos (x, X_0) pela matemática clássica será $d=0$ e de acordo com esta definição, os valores negativos serão

desconsiderados. Esta proposição é na verdade a medida de um grau para um ponto que não pertence ao intervalo. Na prática deve ser considerado a relação da distância entre um ponto e dois intervalos diferentes.

A distância entre um ponto x a dois intervalos $X_0 = (a, b)$ e $X = (c, d)$ com $X_0 \subset X$ é dada pela expressão (3.8).

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0), & \text{se } x \notin X_0 \\ -1, & \text{se } x \in X \end{cases} \quad (3.8)$$

A definição de função de pertinência pode ser observada supondo que $X_0 = (a, b)$, $X = (c, d)$, $X_0 \subset X$ e que não existem pontos comuns finais de intervalo. A função de dependência para um ponto x relativa aos intervalos X_0 e X é expressa por (3.9).

$$K(x) = \frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)} \quad (3.9)$$

Com as seguintes restrições:

- i)* $x \in X_0$ e $x \neq a, b \Leftrightarrow K(x) > 0$;
- ii)* $x = a$ ou $x = b \Leftrightarrow K(x) = 0$;
- iii)* $x \notin X_0, x \in X$ e $x \neq a, b, c$ e $d \Leftrightarrow -1 < K(x) < 0$;
- iv)* $x = c$ ou $x = d \Leftrightarrow K(x) = -1$;
- v)* $x \notin X$ e $x \neq c$ e $d \Leftrightarrow K(x) < -1$;

Substituindo $D(x, X_0, X)$ dentro da função de dependência em (3.9), têm-se (3.10).

$$K(x) = \begin{cases} \frac{-2\rho(x, X_0)}{|b-a|}, & \text{se } x \in X_0 \\ \frac{\rho(x, X_0)}{\rho(x, X) - \rho(x, X_0)}, & \text{se } x \notin X_0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Na Fig. 3.4 é apresentado o gráfico triangular que representa a função de dependência $K(x)$, onde $X_0 = (a, b)$ é a região de interesse com $K(x) > 0$ e $X = (c, d)$ o domínio da extensão formado pelos pontos que não pertencem ao conjunto das soluções com $-1 < K(x) < 0$, mas que possuem um grau de dependência, assim ainda têm chances de vir a pertencer ao conjunto das possíveis soluções.

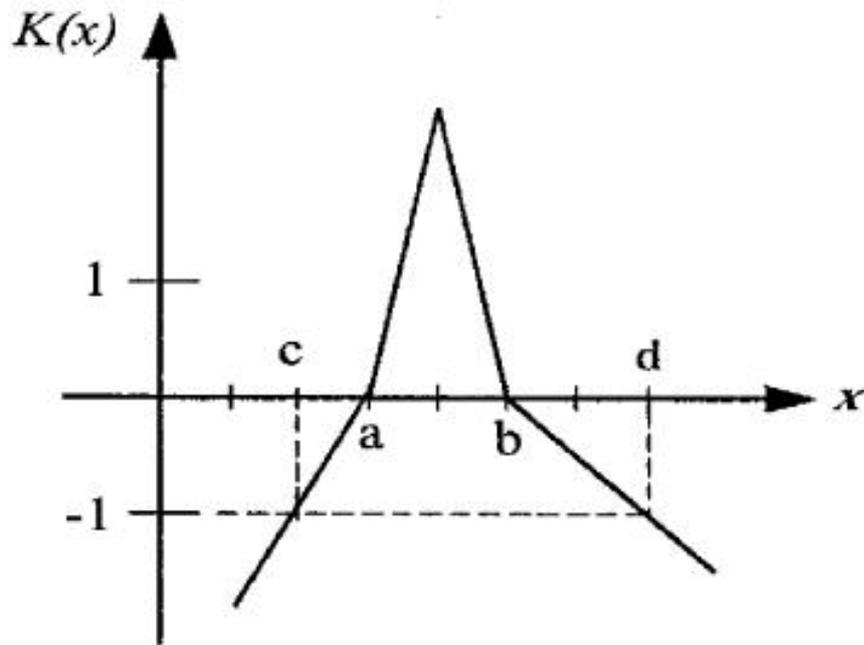


Figura 3.4: Função de dependência adaptada de [63]

3.5 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos e definições sobre o estudo da Teoria da Extensão que é dividida em teoria do elemento matéria e teoria de conjuntos extensos. Foram abordadas a matemática de extensão, as restrições para a construção do elemento matéria e o grau e a função de dependência que determina o uso dos conjuntos extensos.

O entendimento destes conceitos são necessários para que a teoria possa ser aplicada a análise do gás dissolvido (AGD), que é um método utilizado para determinação da condição do isolamento em transformadores de potência, o qual é evidenciado nesta Dissertação. O objetivo em se aplicar essa teoria está na necessidade de melhorar o nível de acertos de falhas quando é feito o uso das Normas IEC (método três-relações), IEEE (método de Rogers) ou NBR7274 (método de Rogers modificado), pois existem situações em que as Normas tornam-se imprecisas, incompatíveis ou contraditórias na detecção das falhas, área que a Teoria da Extensão tem sido promissora.

4 TEORIA DA EXTENSÃO APLICADA AO DIAGNÓSTICO DE FALHAS

A Teoria da Extensão se apresenta como uma metodologia bastante singular para tratar de situações que envolvem problemas de incompatibilidade e contradição. Na aplicação proposta - diagnóstico de falhas em transformadores de potência a partir da análise do gás dissolvido (AGD) - a incompatibilidade está no resultado da análise de óleo feito pelo método da cromatografia de gases, no qual os valores dos gases (*ppm*), quando relacionados, fogem às especificações clássicas (Normas IEEE 57.104 (1991), IEC 605 (1999) e NBR7274 (1999)) e não apontam um resultado de falha.

Nos Capítulos 2 e 3 foram apresentados os problemas, as técnicas e a importância do diagnóstico de falhas, definindo como método de análise o AGD, por estar bem consolidado na literatura nacional e internacional para os casos de falhas incipientes. Foi realizada uma revisão dos trabalhos publicados, cujo objeto de estudo é o diagnóstico de falhas, nos quais são abordadas várias técnicas para implementação do AGD, como o uso de redes neurais, algoritmos genéticos, redes bayesianas, lógica *fuzzy*, entre outras técnicas inteligentes.

A escolha da Teoria da Extensão, além de ser voltada para tratar problemas já mencionados, está relacionada à facilidade de compreensão, localizando-se dentro do domínio da matemática, numa região nem muito complexa nem muito simples. Isto permite uma aplicação rápida para a construção do AGD, pois envolve conceitos básicos da matemática clássica como a teoria de conjuntos e conceitos mais complexos como os sistemas inteligentes. Desta forma, já que a análise dos gases em um transformador é um problema complexo, não seria interessante utilizar uma ferramenta ainda mais complexa para realizar o diagnóstico.

Foi também definida a base da Teoria da Extensão, lembrando que é dividida em teoria do elemento matéria e teoria dos conjuntos extensos, bem como as principais restrições e a função de dependência ou função de correlação que indica o grau de dependência de um elemento (neste caso a relação entre gases) e a possível falha.

Neste Capítulo é formulada a aplicação da teoria no diagnóstico de falhas causadas pela ação do aumento das taxas de gases dentro do transformador. Para isso são utilizados os dados da Norma NBR 7274 (1999) que é baseada na IEC 599 (1978), para definir os parâmetros de domínio clássico e da vizinhança (domínio da extensão), onde a relação das concentrações de gases poderão indicar uma condição de falha.

A NBR 7274 revisada em 1999, sugere a utilização do método de Rogers, porém com algumas modificações como a alteração do valor limite da relação C_2H_2/C_2H_4 de 0.5 para 0.1 e a eliminação do critério C_2H_6/CH_4 que era usado para determinar sobreaquecimento de baixa temperatura. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são apresentadas as regras de códigos e o diagnóstico das falhas para o método de Rogers modificado, utilizado na NBR 7274.

Tabela 4.1: Definição de códigos do método Rogers

Relação de gases	Código de diferentes taxas de gases		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
<0.1	0	1	0
0.1-1	1	0	0
1-3	1	2	1
>3	2	2	2

Tabela 4.2: Classificação das falhas

n°	Tipo de Falha	Código das relações de gases		
		C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
1	não há falha	0	0	0
2	descarga parcial de energia de baixa densidade	0	1	0
3	descarga parcial de energia de alta densidade	1	1	0
4	descarga de baixa energia - arco	1 ou 2	0	1 ou 2
5	descarga de alta energia - arco	1	0	2
6	Falha térmica de baixa temperatura <150 °C	0	0	1
7	Falha térmica de baixa temp. 150 ~ 300 °C	0	2	0
8	Falha térmica de média temp. 300 ~ 700 °C	0	2	1
9	Falha térmica de alta temp. > 700 °C	0	2	2

Para a interpretação dos códigos utilizados nas relações de gases, podem ser destacadas as seguintes observações:

- As relações com denominador igual a zero são consideradas iguais a zero;
- Os valores dados para as relações devem ser considerados apenas como típicos;
- A relação C_2H_2/C_2H_4 se eleva de um valor compreendido entre 0,1 e 3 a um valor superior a 3 e a relação C_2H_4/C_2H_6 de um valor compreendido entre 0,1 e 3 a um valor superior a 3 quando a intensidade da descarga aumenta;
- Este tipo de falha é indicada normalmente por um aumento da concentração dos gases. A relação CH_4/H_2 é normalmente da ordem de 1; o valor real superior ou inferior a unidade, depende de numerosos fatores tais como, o tipo de sistema de preservação do óleo, a temperatura e a qualidade do óleo;
- Um aumento da concentração de C_2H_2 pode indicar que a temperatura do ponto quente é superior a 1000 °C;
- Os transformadores equipados com comutador de tensões sob carga (OLTC) podem indicar falhas do tipo 202/102 se os gases gerados pela decomposição do óleo formados no comutador puderem se difundir no óleo do tanque principal do transformador;
- Na prática podem ocorrer combinações de relações diferentes da tabela. Para estes casos deve-se considerar a taxa de evolução dos gases.

Já o equivalente às falhas pode ser caracterizado através de nove tipos. Cada tipo está relacionado com um efeito térmico ou elétrico, assim pode-se considerar as seguintes observações:

- A falha 1 representa o envelhecimento normal ou natural;
- A falha 2, as descargas nas bolhas de gás resultantes de impregnação incompleta, de supersaturação ou de alta umidade;
- A falha 3, a mesma condição da falha 2, mas com a perfuração da isolamento sólida;
- A falha 4, centelhamento contínuo no óleo devido às más conexões de diferentes potenciais ou potenciais flutuantes. Ruptura dielétrica do óleo entre materiais sólidos;

- A falha 5, descargas de potência. Arco. Ruptura dielétrica do óleo entre enrolamentos, entre espiras ou entre espira e massa, corrente de interrupção no seletor;
- As falhas 6, 7, 8 e 9, sobreaquecimento local do núcleo devido à concentrações de fluxo. Pontos quentes de temperatura crescente, desde pequenos pontos no núcleo, sobreaquecimento do cobre devido à correntes de Foucault, maus contatos (formação de carbono por pirólise) até pontos quentes devido à correntes de circulação entre núcleo e carcaça.

4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A Teoria da Extensão ou “*Extenics*” é formada pela união da teoria de elemento matéria com a teoria de conjuntos extensos. Para gerar o método de diagnóstico é preciso inicialmente aplicar a teoria de elemento matéria usando os códigos da NBR 7274.

No diagrama de blocos (Fig. 4.1) pode-se observar os passos para implementação da metodologia, começando com a transformação da NBR 7274 para elemento matéria, depois a definição dos intervalos que formam o conjuntos da extensão, posteriormente a definição da Função Relação de Extensão (FRE) a ser utilizada e finalmente a aplicação do algoritmo de cálculo.

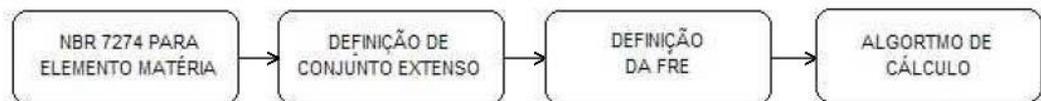


Figura 4.1: Diagrama de implementação do método

No primeiro passo, o elemento matéria para AGD é modelado como uma matriz multidimensional (4.1) no qual R_i é o elemento matéria para a falha i , N_i é o nome da falha i , c_1, c_2, c_3 corresponde as três relações de gases C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 e V_{i1}, V_{i2}, V_{i3} o intervalo relacionado à falha.

$$R = \begin{pmatrix} N_i & c1 & V_{ij} \\ & c2 & V_{ij} \\ & \vdots & \vdots \\ & c3 & V_{ij} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Na Tabela 4.3 é mostrada a substituição do elemento matéria na matriz R_i para os nove tipos de falhas V_{ij} ($j=1,2,3$ e $i=1,2,\dots,9$).

Tabela 4.3: Elemento matéria para AGD

n° Falha	1	2	3
R_i	$\begin{pmatrix} N_1 & c1 & [0, 0.1] \\ & c2 & [0.1, 1] \\ & c3 & [0, 1] \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} N_2 & c1 & [0, 0.1] \\ & c2 & [0, 0.1] \\ & c3 & [0, 1] \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} N_3 & c1 & [0.1, 3] \\ & c2 & [0, 0.1] \\ & c3 & [0, 1] \end{pmatrix}$
n° Falha	4	5	6
R_i	$\begin{pmatrix} N_4 & c1 & [0.1, \infty] \\ & c2 & [0.1, 1] \\ & c3 & [1, \infty] \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} N_5 & c1 & [0.1, 3] \\ & c2 & [0.1, 1] \\ & c3 & [3, \infty] \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} N_6 & c1 & [0, 0.1] \\ & c2 & [0.1, 1] \\ & c3 & [1, 3] \end{pmatrix}$
n° Falha	7	8	9
R_i	$\begin{pmatrix} N_7 & c1 & [0, 0.1] \\ & c2 & [1, \infty] \\ & c3 & [0, 1] \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} N_8 & c1 & [0, 0.1] \\ & c2 & [1, \infty] \\ & c3 & [1, 3] \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} N_9 & c1 & [0, 0.1] \\ & c2 & [1, \infty] \\ & c3 & [3, \infty] \end{pmatrix}$

Pode-se observar que dos nove tipos de elemento matéria para AGD apresentados na Tabela 4.3, existem três tipos de classificação:

- i) $V_{ij} = [0, b]$ para os casos do tipo: $V_{11}=[0, 0.1]$;
- ii) $V_{ij} = [a, b]$ (com $a > 0$), para os casos do tipo: $V_{31}=[0.1, 1]$;
- iii) $V_{ij} = [a, +\infty]$ (com $a > 0$), para os casos do tipo: $V_{53}=[3, \infty]$;

Faz-se necessário este tipo de descrição, devido à aplicação da teoria de conjuntos extensos, pois o problema é encontrar uma função de dependência, agora denominada de função de relação de extensão (FRE) que possa representar os três tipos de intervalos.

A FRE tenta modelar o comportamento dos gases com relação à falha. Portanto, quando a FRE é maior que zero, isto indica o grau em que o elemento pertence ao conjunto, e quando é menor que zero, indica o grau que o elemento não pertence ao conjunto. Na prática, esta variação é definida no intervalo $[-1, 1]$, assim quando a FRE é -1 , o elemento não pertence completamente ao conjunto de extensão e quando é igual a 1 , o elemento pertence completamente ao conjunto da extensão.

Não obstante, quando a relação entre os gases apresenta valores que tendem a $+\infty$ (item *iii*), tem-se utilizado uma linearização por seção, a fim de superar a limitação causada e o diagnóstico se torna mais simples. Assim, a partir de dados práticos podem-se definir valores hipotéticos para substituir o valor ∞ , tanto para FRE maior que zero (domínio clássico), quanto para os intervalos em que FRE é menor que zero e maior que -1 (domínio da vizinhança).

Em [64] é definido os valores “10” (para as relações C_2H_2/C_2H_4 e CH_4/H_2) e “18” (para a relação C_2H_4/C_2H_6) como limite máximo que o “ ∞ ” pode assumir e os gráficos das classificações citadas anteriormente. Para o gráfico da Fig. 4.2, a FRE é classificada como $V_{ij} = [0,b]$, onde “ V_{ij} ” é o limite da relação de gases. Neste gráfico, a FRE é maior que zero quando “ v ” se aproxima do vértice do triângulo até alcançar o valor máximo 1. A FRE torna-se mais negativa a medida que “ v ” se afasta do índice “b” em direção a “d”.

Nas Fig. 4.3 com $V_{ij} = [a,b]$ ($a > 0$) e Fig. 4.4 com $V_{ij} = [a,+\infty]$ ($a > 0$), a FRE pode assumir valores ($0 < FRE \leq 1$) quando “ v ” se aproxima do vértice do triângulo e ($-1 < FRE \leq 0$), quando se afasta do domínio clássico (a,b) respectivamente.

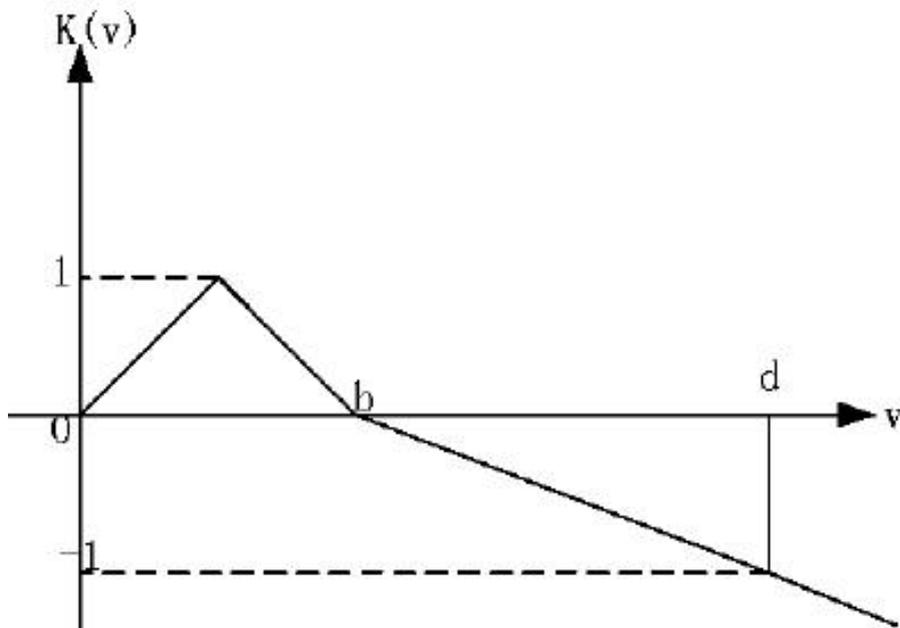


Figura 4.2: FRE do primeiro tipo de intervalo adaptada de [64]

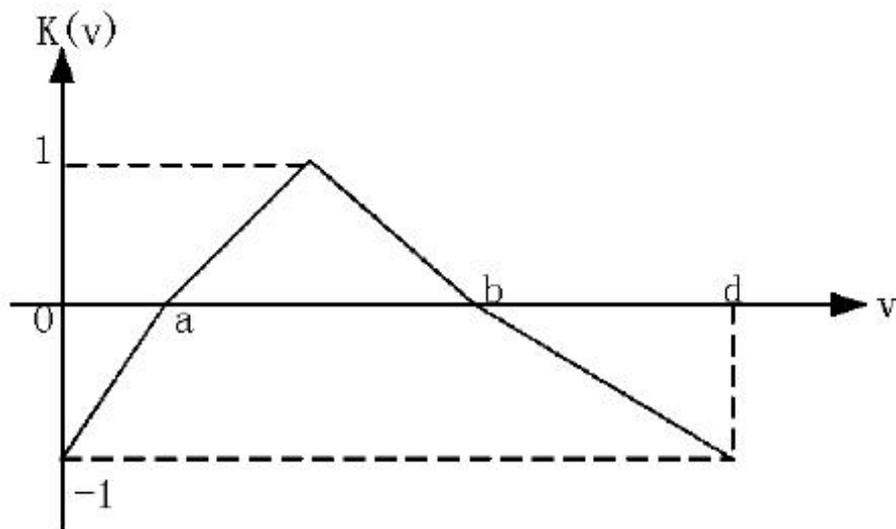


Figura 4.3: FRE do segundo tipo de intervalo

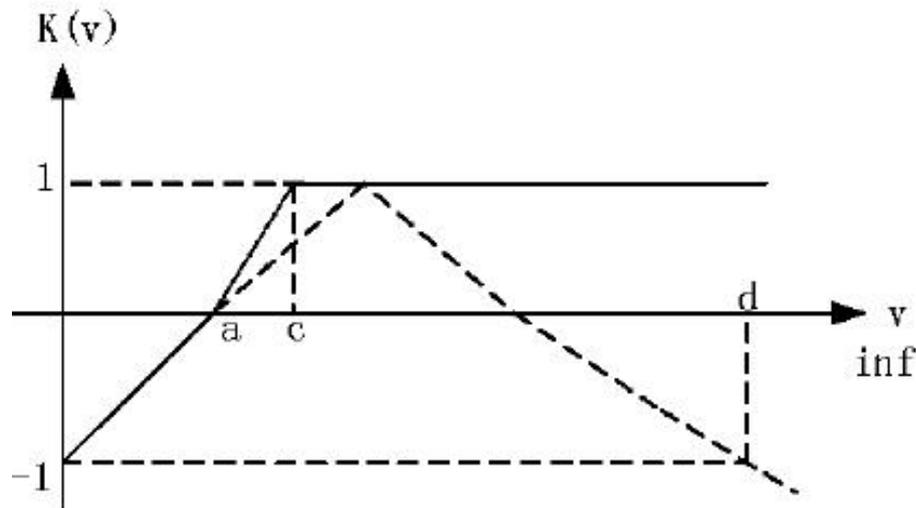


Figura 4.4: FRE do terceiro tipo de intervalo

No segundo passo, os limites que representam os conjuntos extensos são divididos em domínio clássico, onde estão os intervalos determinados pela NBR 7274 (valores maiores que zero e menores ou igual a 1) e domínio da vizinhança ou domínio da extensão (valores menores que zero e maiores que -1).

O passo seguinte, de acordo com o diagrama de blocos, é definir a FRE que calcula o grau de dependência que um elemento do conjunto tem em relação à falha que se deseja determinar. Foi utilizado a FRE de (3.18) no qual o valor de “ x ” indica se o elemento pertence ao domínio clássico ou se pertence ao domínio da extensão. Portanto, a FRE pode assumir valores positivos para indicar uma falha que ocorreu, que está na iminência de ocorrer ou que pode progredir para uma falha (falha incipiente). Neste caso,

deverá ser sugerido um acompanhamento contínuo e uma análise de gases com maior frequência.

Com todos os passos realizados, a etapa final é incorporar essas informações num algoritmo de cálculo para que o diagnóstico ocorra de forma rápida, estruturada e possa ser aplicado em “ n ” análises de gases. No algoritmo são geradas rotinas de cálculo que transformam os valores dos gases de uma análise cromatográfica em vetores compostos com as relações entre gases C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_2/C_2H_4 e CH_4/H_2 . Os elementos das relações são comparadas caso a caso dentro da FRE e assim os graus de dependência para cada falha são gerados.

Na Fig. 4.5 é apresentado o fluxograma do algoritmo que foi implementado. Após a entrada de dados dos gases são determinados os domínios e é feito o cálculo das relações entre gases. A partir dessas informações é calculado o valor da FRE gerando três graus de pertinência para cada falha (na NBR7274 são considerados 9 tipos de falhas).

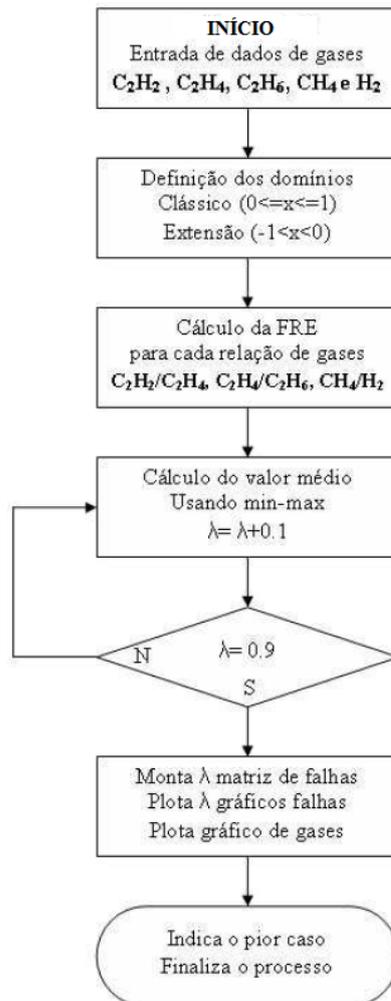


Figura 4.5: Algoritmo implementado

4.1.1 Geração de saída de processos

A transformação desses três valores de dependência em um único termo que representa a condição de falha, pode ser feita através de uma média aritmética simples, cuja função é minimizar a relação entre valores. Assim, como os valores de dependência variam apenas entre $[-1,1]$, não haveria a presença de números muito grandes e o valor médio representaria bem a amostra.

Contudo, a FRE trata o problema das falhas como sendo uma função triangular, no qual a condição de risco (condição real de falha) sempre ocorre quando o valor das relações de gases se aproximam do vértice do triângulo. Na prática, isto nem sempre pode ser interpretado dessa forma, pois as reações químicas que ocorrem dentro do transformador, associadas as variações de temperatura são problemas não-lineares e nem sempre de simples solução. Existe ainda as variáveis de erro que devem ser consideradas, como erro de aquisição de dados, erro na obtenção da amostra em campo, erro das sondas de medição, além das próprias incertezas (falta de conhecimento a priori ao efeito de uma condição) do método de análise.

O que se faz é uma aproximação que garanta um resultado satisfatório e indique um caminho para o diagnóstico. O uso da função fuzzy max-min em (4.2) [65] para cálculo do valor médio foi introduzida na tentativa de melhorar essa aproximação atribuindo mais uma variável de correção que é o índice λ variando entre 0.1 a 0.9 (a função clássica define os valores de λ entre $[0,1]$), a fim de condicionar a falha mais a direita ou mais a esquerda do vértice do triângulo, sendo possível projetar nove cenários de falhas incipientes e através disto poder escolher entre a melhor e a pior condição de falha.

$$V_{\lambda}(a, b, c) = \lambda * \max(a, b, c) + (1 - \lambda) * \min(a, b, c) \quad (4.2)$$

Em que:

a, b, c = relação entre os gases.

λ = índice entre $[0,1]$.

Certamente, o que se deseja alcançar é a obtenção de um perfil de falhas incipientes, acompanhando os possíveis aumento dos níveis dos gases dentro do transformador, ou seja, a partir de uma análise de óleo e dados de cromatografia encontrar a condição atual de falha e caso não ocorra medidas corretivas, acompanhar a progressão para os estágios seguintes que seriam as falhas múltiplas.

4.2 ESTUDO DE CASO

A aplicação da metodologia foi dividida em três módulos. O primeiro constituído da replicação de dados de ensaios de óleo encontrados em artigos e periódicos internacionais em que foram aplicadas outras metodologias de diagnóstico. O segundo módulo é composto de dados de ensaios de óleo obtidos através da norma IEC TC10 que é uma base de dados de ensaios utilizada para testes. O terceiro módulo são dados de ensaios de óleo encontrados em trabalhos nacionais e obtidos de concessionárias [66].

4.2.1 Amostras obtidas de artigos

Foram utilizadas para testes as amostras de AGD contidas em [63] e [64]. Estes dados são bastantes conhecidos e já foram publicados em vários trabalhos, por isso a intenção de replicá-los para teste da Teoria da Extensão.

Relembrando os passos para aplicação da metodologia, primeiro foi feita a transformação dos dados da norma NBR7274 em elemento matéria como na Tabela 4.3, depois o uso da FRE de (3.18) para as condições em que a relação dos três gases pertence ou não pertence ao conjunto das soluções (domínio clássico e domínio da extensão). A partir desses dados é utilizada a função de max-min em (4.2). O algoritmo calcula as possíveis soluções de falhas e apresenta os resultados na forma de tabelas com o percentual de acerto para cada variação de λ .

Na Tabela 4.4 é mostrado um diagnóstico de falhas incipientes para um transformador com 20 amostras de óleo. É feita uma comparação entre os resultados obtidos utilizando a NBR7274 e a Teoria da Extensão. A função do método desenvolvido é avaliar os resultados que a Norma não consegue diagnosticar e para esses casos de contradição ou incompatibilidade obter uma solução satisfatória. Observa-se que com a aplicação da NBR7274 não foi possível determinar as condições de falhas para os ensaios 2, 3, 5, 6 e 13. Estas são condições em que um valor ou os valores das relações de gases estão fora dos limites definidos para cada gás e, portanto, é difícil definir um diagnóstico.

Comparando os dois métodos, a NBR7274 obteve um acerto de 75 %, 15 em 20 amostras, enquanto a metodologia da Teoria da Extensão obteve um acerto bem superior, 95 %. Isto significa que a FRE utilizada representa bem as condições das relações dos gases dentro do transformador e o grau de dependência gerado sempre indica uma condição de

Tabela 4.4: Comparação dos resultados 1

nº	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Falha	Extenics	NBR
1	200	700	250	740	1	8,9	8,9	8
2	300	490	180	360	95	8	8	N
3	56	61	75	32	31	3	3	N
4	33	26	6	5.3	0.2	1	1	1
5	176	205.9	47.7	75.7	68.7	4	8	N
6	70.4	69.5	28.9	241.2	10.4	9	9	N
7	162	35	5.6	30	44	5	5	5
8	345	112.25	27.5	51.5	58.75	4	4	4
9	181	262	210	528	0	8	8	8
10	172.9	334.1	172.9	812.5	37.7	9	9	9
11	2587.2	7.882	4.704	1.4	0	2	2	2
12	1678	652.9	80.7	1005.9	419.1	5	5	5
13	206	198.9	74	612.7	15.1	9	9	N
14	180	175	75	50	4	1,7	1,7	1
15	34.45	21.92	3.19	44.96	19.62	5	5	5
16	51.2	37.6	5.1	52.8	51.6	5	5	5
17	106	24	4	28	37	5	5	5
18	180.85	0.574	0.234	0.188	0	2	2	2
19	27	90	42	63	0.2	8	8	8
20	138.8	52.2	6.77	62.8	9.55	5	5	5

falha atual ou incipiente. É importante destacar que a aplicação da Teoria da Extensão não descarta ou invalida o uso da Norma ou das Normas existentes e sim, incorpora mais elementos para complementar os pontos em que os resultados não são satisfatórios. Em síntese, torna-se uma ferramenta de prognóstico que ajuda na solução do problema, porém como toda ferramenta de análise possui também um percentual de erro que é corrigido pela variação do índice λ .

Na Fig. 4.6 são apresentados oito gráficos de linha com as falhas ocorridas nas amostras de nº 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13 e 14 da Tabela 4.4, e o comportamento das curvas com a aplicação do índice λ [0.1, 0.9] até a obtenção do resultado final. Na mesma

seqüência foram alocados oito gráficos de barras com as proporções relativas ($\%ppm$) dos cinco gases chave utilizados no diagnóstico, em que as barras 1, 2, 3, 4 e 5 representam respectivamente os gases H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 .

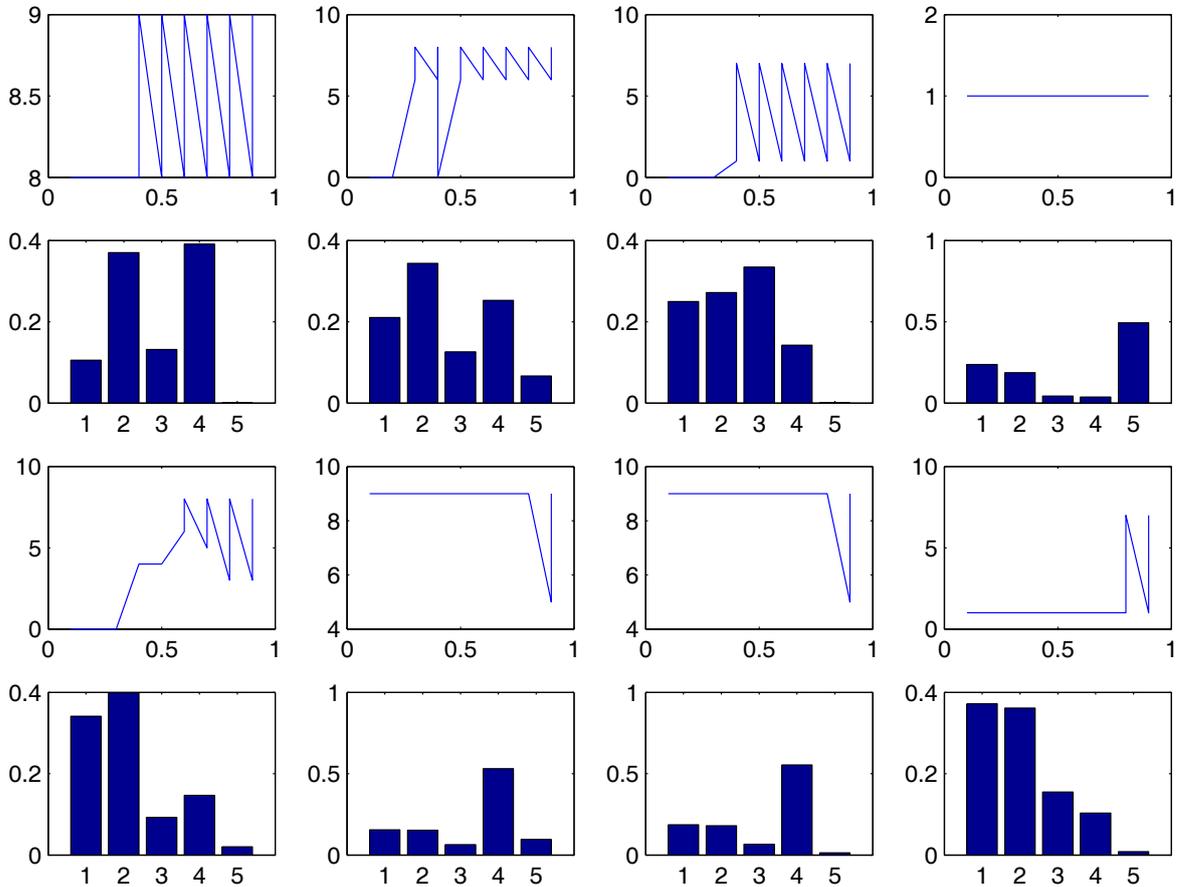


Figura 4.6: Gráfico de falhas 1

Analisando o primeiro gráfico, da amostra de gás de n° 1 é possível observar para $\lambda \leq 0.4$ que a falha inicial é a de n° 8 que indica falha térmica de média temperatura (Tabela 4.2) $300^{\circ}\text{C} \leq t \leq 700^{\circ}\text{C}$, onde t é uma temperatura do óleo dentro desse intervalo. Variando λ de 0.5 até 0.9, há a ocorrência das falhas múltiplas de n° 8 e 9, onde 9 indica a ocorrência de falha térmica de alta temperatura $t > 700^{\circ}\text{C}$.

No gráfico de barras equivalente a amostra de gás de n° 1 são mostrados os respectivos níveis de gases encontrados na amostra. Nota-se que há uma maior proporção relativa dos gases 2 e 4 (CH_4 e C_2H_4) que indica metano e etileno junto com pequena quantidade de hidrogênio e etano. Não há traços de acetileno que poderiam ser formados se a falha fosse severa ou se envolvesse contatos elétricos. Esta análise contribui na indicação que a falha é puramente térmica.

Para a amostra de gás nº 2 é indicado através do resultado uma variação da falha entre 6 e 8. O resultado de nº 6 indica falha térmica de baixa temperatura com $t < 150^{\circ}\text{C}$ e uma evolução até a falha térmica de média temperatura $300^{\circ}\text{C} \leq t \leq 700^{\circ}\text{C}$. No gráfico de barras as proporções relativas maiores são dos gases 2 e 4 (metano e etileno), porém existe um aumento do gás 1 que é o hidrogênio. Como o etileno ainda apresenta proporção menor que o metano, isto implica que a falha térmica atual é a 6 e a falta incipiente é a 8.

Para a amostra de gás nº 3 é indicado através do resultado uma variação da falha entre 1 e 7. O resultado de nº 1 é a ausência de falha ou envelhecimento natural, já a falha de nº 7 indica falha térmica de baixa temperatura $150^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}$. No gráfico de barras, as maiores proporções relativas são dos gases 2 e 3 (metano e etano), seguido pelo gás 1 (hidrogênio), pequena quantidade do gás 4 (etileno) e traços do gás 5 (acetileno). As análises indicam que não existe condição de falha atual, porém há uma predisposição devido a presença dos gases 3 e 4 para uma condição de falha térmica próximo dos 300°C , região onde se formam esses gases.

Para a amostra de gás nº 4 é indicado através do resultado uma falha de nº 1. Neste caso não existe falha, apenas envelhecimento natural, pois as proporções de gases apresentado no gráfico de barras indicam que mesmo existindo uma proporção bem maior do gás 5 (acetileno) que pode ser um indicativo de falha elétrica, as proporções dos gases 1 e 2 importantes para que ocorra este tipo de falha ainda são baixos e não apresentam risco imediato, porém devem ser monitorados freqüentemente.

Para a amostra de gás nº 5 é indicado através do resultado uma variação da falha entre 3, 4, 5, 6 e 8. O resultado de nº 3 indica falha elétrica com descarga parcial de energia de alta intensidade geradas a partir do efeito corona e as falhas 4 e 5 são produzidas por descarga de baixa e alta energia geradas através de arco. As falhas 6 e 8 já foram apresentadas e indicam falha térmica de baixa e média temperatura $t < 150^{\circ}\text{C}$ e $300^{\circ}\text{C} \leq t \leq 700^{\circ}\text{C}$. Pelo gráfico de barras os gases com maior proporção relativa são 1 e 2 (hidrogênio e metano), assim, por esta análise, pode-se concluir que a falha é extremamente elétrica, já que o hidrogênio e metano com pequenos traços de etano e etileno são formados na presença de corona.

Neste caso, para um $\lambda > 0.5$ a metodologia aplicada na Teoria da Extensão interpretou como uma falha térmica de alta temperatura por considerar o hidrogênio é um

gás gerado em alta temperatura. É óbvio que se ocorrer uma condição que a temperatura do óleo aumente e os gases formados não são expressivamente considerados dentro das falhas elétricas o algoritmo entenderá que a falha é puramente térmica, contudo a variação do λ permite extrair essas considerações.

Para as amostras de gases de nº 6 e nº 13 foi identificado uma falha de nº 9 para os dois casos, indicando falha térmica de alta temperatura com $t > 700^\circ\text{C}$. Nos gráficos de barras é possível notar que o gás com maior proporção relativa é o de nº 4 (etileno) que só ocorre quando a temperatura interna do transformador atinge valores maiores que 700°C e traços de outros gases em proporções bem pequenas. A condição que levou ao aumento da temperatura e que contribuiu na formação do etileno pode estar relacionada a formação de um arco. Esta hipótese é levantada quando o $\lambda \geq 0.8$ e aparece uma condição de falha de nº 5, portanto a variação do λ ajuda no esclarecimento de algumas dúvidas que podem surgir durante o diagnóstico.

Para a amostra de gás nº 14 são indicadas através do resultado as falhas múltiplas 1 e 7. O resultado de nº 1 já é conhecido e indica que não houve falha, somente envelhecimento natural e a falha nº 7 indica falha térmica de baixa temperatura $150^\circ\text{C} \leq t \leq 300^\circ\text{C}$. No gráfico de linha pode-se analisar a variação do λ e a falha correspondente. Para um $\lambda > 0.8$ aparece a falha nº 7 (falha incipiente) e no gráfico de barras as proporções de gases com maior magnitude são as de nº 1 e nº 2 que são hidrogênio e metano respectivamente. Estes dois gases aparecem frequentemente quando a falha elétrica é do tipo corona. A elevação da temperatura pode ser considerada função desse tipo de falha, embora o diagnóstico só aponte a falha sendo térmica, uma vez que as proporções relativas dos dois gases ainda é baixa a ponto de indicar falha elétrica, porém não deve ser descartada.

Todas essas oito análises foram definidas conforme os resultados obtidos através do algoritmo em que foi implementado a teoria da extensão (gráfico de linha) e das proporções de gases formados na ocorrência de determinadas falhas, apresentadas no chamado “método do gás chave” [23] (gráfico de barras). É válido esclarecer que segundo este método, existe a determinação relativa dos gases gerados que são típicos ou predominantes, sob várias temperaturas (Fig. 4.7), em função do tipo de falha que está ocorrendo. Este método foi sugerido apenas como comparação dos resultados encontrados com a Teoria da Extensão, a fim de mostrar uma coerência nas soluções do problema.

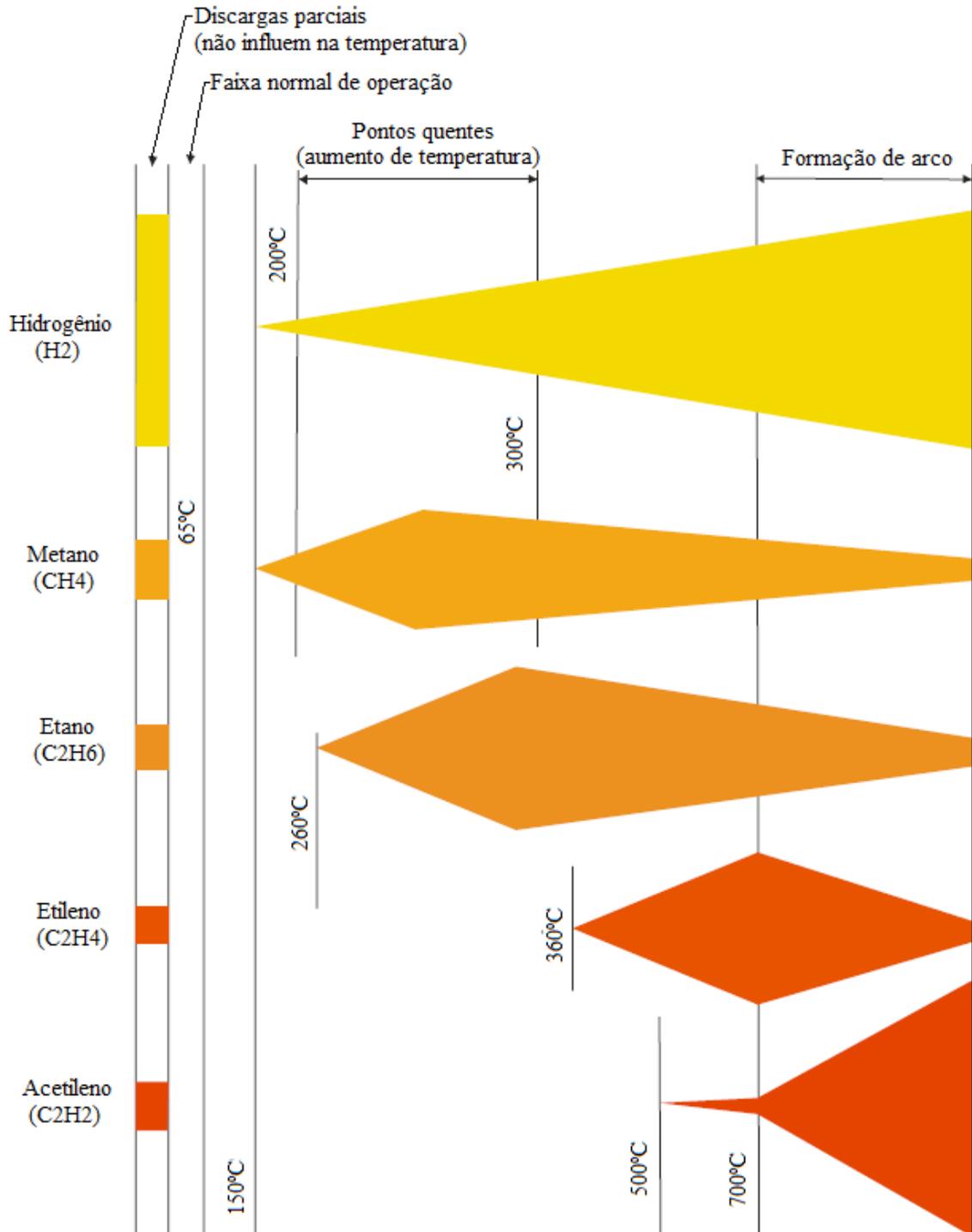


Figura 4.7: Temperatura dos gases adaptada de [67]

Na Tabela 4.5 é apresentado um segundo diagnóstico constando de 22 amostras de gases, dos quais foram selecionados quatro falhas mais significativas. Foi apresentada a comparação entre o diagnóstico correto e os métodos NBR e Teoria da Extensão. As falhas de nº 10, 19, 20 e 22 não foram encontradas pelo método NBR que obteve nível de acerto de 81 %, enquanto com a aplicação da Teoria da Extensão o nível de acerto foi de 90 %. Um fato importante na aplicação da Teoria da Extensão é que mesmo se o diagnóstico não esteja totalmente correto, sempre o método encontra um resultado de falha que é um indicativo da evolução do gás dentro do transformador.

Tabela 4.5: Comparação dos resultados 2

nº	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Falha	Extenics	NBR
1	14.7	3.7	10.5	2.7	0.2	1	1	1
2	345	112.3	27.5	51.5	58.8	4	4	4
3	181	262	41	28	0	7	7	7
4	173	334	172	812.5	37.7	9	9	9
5	127	107	11	154	224	5	5	5
6	60	40	6.9	110	70	5	5	5
7	220	340	42	480	14	9	9	9
8	170	320	53	520	3.2	9	9	9
9	27	90	42	63	0.2	8	8	8
10	565	53	34	47	0	4	6	N
11	56	286	96	928	7	9	9	9
12	200	48	14	117	131	5	5	5
13	78	161	86	353	10	9	9	9
14	32.4	5.5	1.4	12.6	13.2	5	5	5
15	980	73	58	12	0	2	2	2
16	160	130	33	96	0	6	6	6
17	650	53	34	20	0	2	2	2
18	95	110	160	50	0	7	7	7
19	300	490	180	360	95	8	8	N
20	200	700	250	740	1	8,9	8,9	8
21	625	130	47	2	0	7	7	7
22	56	61	75	32	31	3	2,3,7	N

Na Fig. 4.8 é apresentado o resultado obtido pela Teoria da Extensão para as falhas não diagnosticadas pela NBR (falhas de nº 10, 19, 20 e 22) e através do gráfico de barras as respectivas proporções relativa dos gases dentro a amostra. Nota-se que existem dois conjuntos de gráficos de linhas que simbolizam o resultado da análise realizada com o algoritmo da Teoria da Extensão. Na primeira linha estão os quatro resultados com 100 % de acerto e na segunda linha estão os resultados que foram considerados verdadeiros, todos os valores maiores que 90 %. Estes gráficos ajudam a visualizar a progressão da falha em função da variação do λ .

A terceira linha é formada por um gráfico de barras que contém as proporções relativas dos gases em relação à condição de falha térmica ou elétrica. Para falha térmica ocorrida pela deteriorização do óleo os percentuais são: H_2 (2 %), CH_4 (16 %), C_2H_6 (19 %) e C_2H_4 (63 %). Para a falha elétrica do tipo corona os valores são: H_2 (85 %), CH_4 (13 %), C_2H_6 (1 %) e C_2H_4 (1 %). Para a falha elétrica do tipo arco os valores são: H_2 (60 %), CH_4 (5 %), C_2H_6 (2 %) e C_2H_4 (3 %).

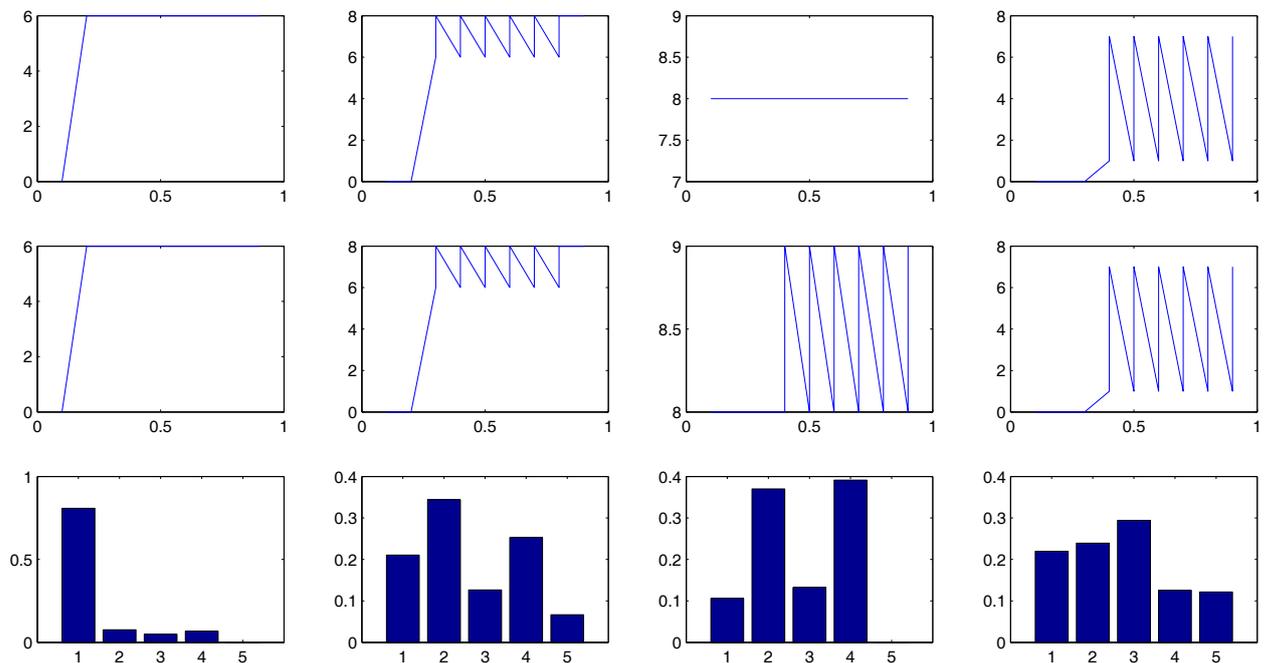


Figura 4.8: Gráfico de falhas 2

Para a amostra de gás nº 10 é indicado através do resultado a falha de nº 6 que está relacionada com falha térmica de baixa temperatura $t < 150^\circ\text{C}$. Embora o resultado correto seria a falha de nº 8 que é falha térmica de média temperatura $300^\circ\text{C} \leq t \leq 700^\circ\text{C}$. Pelo gráfico de barras é possível observar que a maior proporção relativa é do gás 1

(hidrogênio) que é gerado na presença de descarga parcial de baixa energia (corona) e traços dos demais gases em proporções bem baixas. A descarga pode ter ocorrido numa intensidade muito pequena, de forma que na análise só foi possível determinar a consequência que é a elevação da temperatura até a condição de falha térmica de média temperatura.

Para a amostra de gás n° 19 é indicado através do resultado a falha de n° 8 que está relacionada com falha térmica de média temperatura $300^{\circ}\text{C} \leq t \leq 700^{\circ}\text{C}$. Ocorreu no diagnóstico uma flutuação entre as falhas 6 e 8 que indica que a falha começou com um nível baixo de temperatura e se agravou até alcançar o nível médio. Pelo gráfico de barras, as maiores proporções relativas são dos gases 2 e 4 (metano e etileno) com a presença do gás 1 (hidrogênio) e traços dos demais gases. Os gases 2 e 4 são gerados em condição de falha térmica, essa afirmação já conhecida contribui na confirmação do diagnóstico.

Para a amostra de gás n° 20 é indicado através do resultado as falhas múltiplas de n° 8 e 9. A falha 8 foi citada anteriormente e está relacionada com falha térmica de média temperatura $300^{\circ}\text{C} \leq t \leq 700^{\circ}\text{C}$ e a falha 9 também está relacionada com temperatura só que para valores $t > 700^{\circ}\text{C}$. No gráfico de barras os gases predominantes foram 2 e 4 (metano e etileno) que são gases quentes formados em altas temperaturas.

A amostra de gás n° 22 obteve um resultado de falhas múltiplas de n° 2, 3 e 7. O resultado correto seria apenas o de n° 3 que representa as descargas parciais de energia de alta densidade (corona). O diagnóstico sugerido optou por uma abordagem mais completa, ou seja, buscou as condições iniciais que seriam as descargas parciais de baixa e alta densidade e a uma consequência associada que é a elevação da temperatura, falha 7, entre $150^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}$.

Para uma análise prática, pode-se incorporar ao algoritmo que para um caso com essas características a opção mais clara seria considerar a falha elétrica como a de maior risco para o equipamento. No gráfico de barras os gases predominantes foram 1, 2 e 3 (hidrogênio, metano e etileno) que são gases quentes formados em baixas e médias temperaturas, porém a presença dos gases 4 e 5 (etileno e acetileno) corroboram para a indicação de falha elétrica do tipo corona.

4.2.2 Base de dados IEC TC10

A segunda etapa de testes foi realizada a partir da base de dados IEC TC10 em [68]. A base de dados IEC TC10 contém valores típicos obtidos entre 10 a 1000 tipos de transformadores em operação em mais de 15 redes mundiais. Estes dados têm sido organizados pelos membros WG13 (Grupo de Trabalho) e de pesquisas prévias realizadas pelo CIGRE 15, no qual os exemplos foram organizados pela influência dos equipamentos (com e sem OLTC, buchas, cabos, etc.), idade e tipo de falha.

Em um transformador, determinar um valor percentual que classifique o equipamento como normal é um compromisso assumido entre a redução prematura do custo de falha e o aumento preventivo dos custos de manutenção. Isto normalmente fica entre 90 % para transformadores de potência e 95 % para buchas e cabos. Calculando uma atual probabilidade de falha em serviço (PFS) é possível melhorar o custo econômico do equipamento para o futuro. Na IEC TC10 são utilizados exemplos com PFS típicos de 90% a 95 % e PFS com valores mais exatos (reais) entre 93 % e 98 %.

Na Tabela 4.6 é apresentada uma amostra de AGD, cujo diagnóstico indicado foi a falha elétrica correspondente a descarga parcial de energia (efeito corona). Embora existam duas categorias, descarga parcial de energia de baixa e alta densidade, o diagnóstico da IEC TC10 admitiu apenas uma única classificação. Pela norma NBR7274 essas falhas são as de nº 2 e 3 respectivamente. Neste caso, a aplicação da Teoria da Extensão obteve acerto de 88 %, enquanto a NBR apenas 44 %.

Tabela 4.6: Descarga parcial de energia (corona)

nº	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Falha	Extenics	NBR
1	32930	2397	157	0	0	2 ou 3	3	3
2	37800	1740	249	8	8	2 ou 3	3	3
3	92600	10200	0	0	0	2 ou 3	3	N
4	8266	1061	22	0	0	2 ou 3	3	N
5	9340	995	60	6	7	2 ou 3	3	N
6	36036	4704	554	5	10	2 ou 3	3	N
7	33046	619	58	2	0	2 ou 3	2	2
8	40280	1069	1060	1	1	2 ou 3	3	3
9	26788	18342	2111	27	0	2 ou 3	1	1

Na Fig. 4.9, das dez amostras de AGD são analisadas apenas quatro casos mais significativos (amostras de nº 3, 4, 6 e 7), através dos gráficos de linha e de barras, contando da variação do λ e das proporções relativa dos gases. As amostras de nº 3, 4 e 6 apresentam condições semelhantes, pois a falha só é confirmada a parti de $\lambda > 0.3$ e as proporções de gases que condicionam a falha de nº3 são os mesmos, hidrogênio e metano. No caso da amostra de gás nº 7 o resultado foi a falha de nº 2, falha elétrica de energia de baixa densidade, logo o gás predominante é o hidrogênio, o metano e o etileno aparecem, mas em taxas muito pequenas.

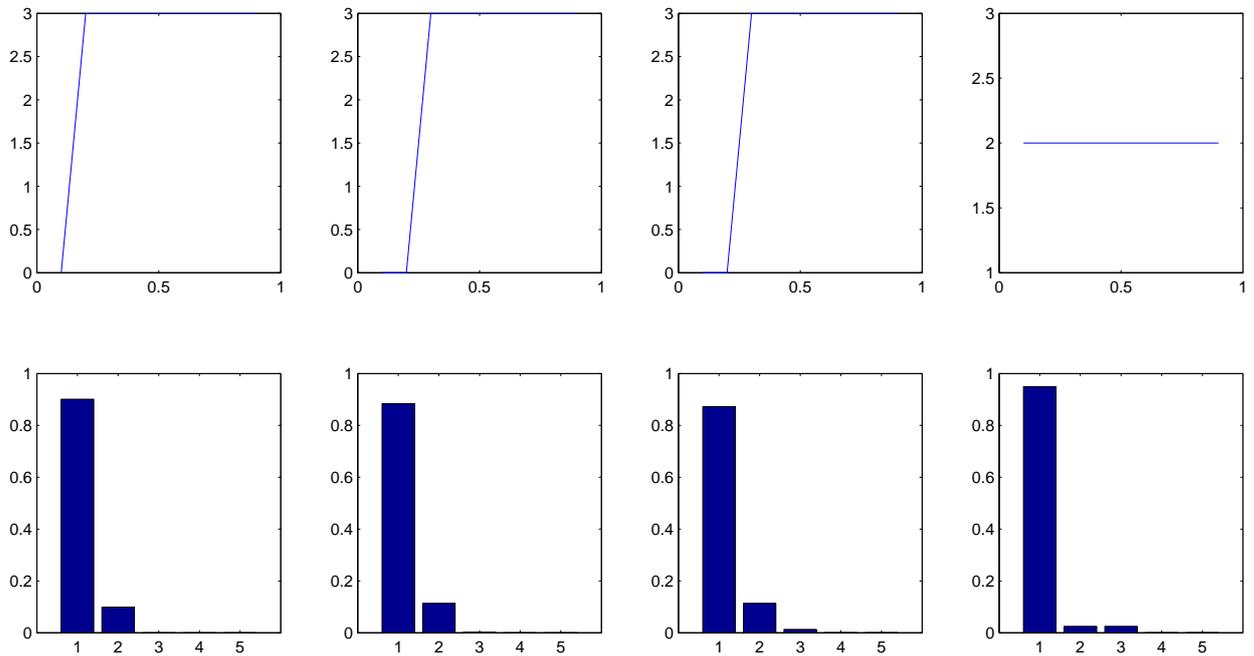


Figura 4.9: Gráfico de falhas (corona)

Durante a aplicação do algoritmo é possível obter uma série de resultados que permitem acompanhar a evolução da falha. Por isso, quando se encontra uma falha múltipla do tipo 2,3 e a solução correta seria apenas o tipo 2, não significa que o diagnóstico esteja incorreto, e sim que a proporção de gases dentro do transformador que gerou a falha do tipo 2, tem um grau de pertinência bem próximo do conjunto de condições que podem gerar a falha do tipo 3 também. Portanto, na prática, essas condições não podem ser descartadas e servem de auxílio para a tomada de decisões de manutenção do equipamento.

Na Tabela 4.7 são apresentadas 26 amostras de gases dos anos de 1972 a 1992, obtidas de diversos equipamentos como, transformadores com e sem OLTC, reatores, buchas, cabos, instrumentação, entre outros. Pretende-se, portanto, a partir desses itens,

analisar a funcionalidade da Teoria da Extensão aplicadas aos outros componentes de um transformador de potência. Para todos os 26 casos a falha característica é a de nº 4 que representa descarga de baixa energia (arco). Obteve-se um nível de acerto de 80 % usando a Teoria da Extensão e de 53 % pelo método NBR.

É apresentado através dos gráficos da Fig. 4.10, quatro amostras de gases obtidas em regiões distintas de um transformador. A falha específica para as quatro amostras é a descarga de baixa energia. Foram selecionados as amostras de nº 11, 18, 22 e 26 devido a NBR não ter alcançado êxito no diagnóstico e por estarem relacionadas com reator, transformador com e sem OLTC e buchas.

O primeiro gráfico de linha representa a amostra de gás de um reator onde ocorreu arco da bucha para o tanque de óleo. A falha foi identificada a partir da quinta iteração de λ , porém no gráfico de barras as proporções dos gases 1 e 3 (hidrogênio e etano) já indicavam uma tendência para descargas do tipo corona, falha nº 3, contudo, a presença de acetileno já representa a possibilidade de arco, com descarga de baixa energia e uma possível evolução para a falha de nº 5, descarga de alta energia.

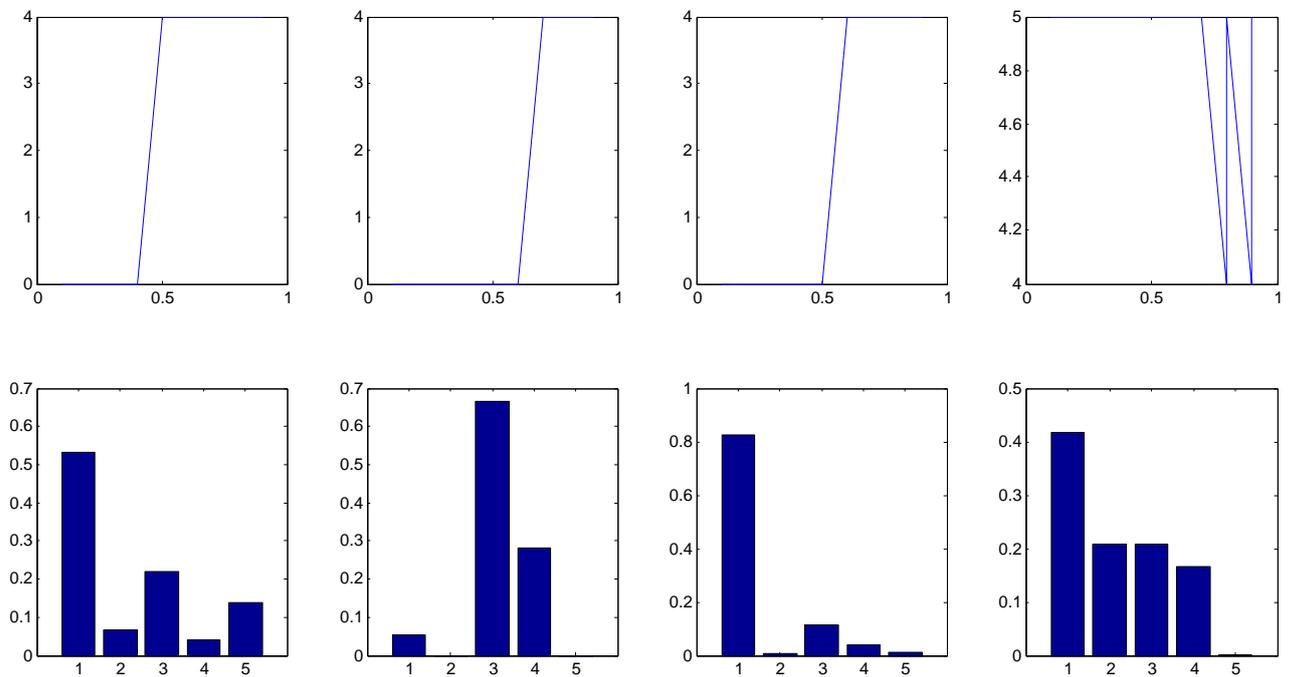


Figura 4.10: Gráfico de falhas (arco)

O segundo gráfico de linha mostra um transformador com OLTC, no qual a falha de nº 4 ocorreu exatamente por contaminação deste dispositivo. O diagnóstico inicial só conseguiu encontrar a solução do problema com a variação do índice $\lambda > 0.7$, sendo

Tabela 4.7: Descarga parcial de energia (arco)

n°	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Falha	Extenics	NBR
1	78	20	28	13	11	4	4	4
2	305	100	541	161	33	4	4	4
3	35	6	482	26	3	4	4	4
4	543	120	1880	411	41	4	5	4
5	1230	163	692	233	27	4	5	5
6	645	86	317	110	13	4	4	5
7	60	10	4	4	4	4	4	N
8	95	10	39	11	0	4	4	4
9	6870	1028	5500	900	79	4	4	4
10	10092	5399	37565	6500	530	4	4	4
11	650	81	270	51	170	4	3	N
12	210	22	7	6	6	4	4	N
13	383	60	159	53	8	4	4	5
14	4230	690	1180	196	5	4	4	4
15	7600	1230	1560	836	318	4	5	4
16	595	80	244	89	9	4	4	5
17	120	25	40	8	1	4	4	4
18	8	0	101	43	0	4	4	N
19	6454	2313	6432	2159	121	4	4	5
20	2177	1049	705	440	207	4	4	4
21	1790	580	619	336	321	4	4	4
22	1330	10	182	66	20	4	4	N
23	4	1	52	7	2	4	4	4
24	1900	285	7730	957	31	4	4	4
25	57	24	30	27	2	4	5	5
26	1000	500	500	400	1	4	4,5	5

imparcial em indicar a falha de nº4 para essa amostra. No gráfico de barras as proporções relativas de maior intensidade são dos gases 3 e 4 (etano e etileno) que normalmente estão relacionados a falhas térmicas. Neste caso, só a observação dos gases não ajudaria na determinação da falha ou geraria um diagnóstico incorreto. A aplicação da Teoria da Extensão adicionou uma nova variável que é o peso que representa cada gás, e isto está formulado de forma intrínseca quando é feita a variação do índice λ . Assim, o grau de dependência para indicar falha elétrica é maior do que seria para falha térmica.

O terceiro gráfico é de um transformador sem OLTC que a falha de nº 4 ocorreu em decorrência de arco do núcleo para a carcaça do equipamento. Nesta amostra de gás o gráfico de barras já denuncia a condição da falha, pois o nível do gás 1 (hidrogênio) está numa proporção muito superior aos outros gases, não havendo dificuldade para diagnosticar a falha. Do mesmo modo, no quarto gráfico de barras o gás 1 (hidrogênio) tem a maior proporção, porém está acompanhado dos gases 2, 3 e 4 (metano, etano e etileno) que ocorrem também em caso de falha de nº 3, descarga de energia de baixa intensidade provocado pelo efeito corona. No gráfico de linhas ocorreu uma predominância da falha de nº 5 até encontrar um resultado das falhas múltiplas 4 e 5 que seria a solução aceita.

A próxima listagem da IEC TC10, mostrado na Tabela 4.8, possui 18 tipos de amostras de gases com a condição de falha de nº 9, falha térmica de alta temperatura $t > 700^\circ\text{C}$. As amostras como no exemplo anterior, descargas de baixa energia, também foram extraídas de vários equipamentos, transformadores com e sem OLTC e reatores. Observa-se que das 18 amostras foram selecionadas apenas quatro (nº 2, 6, 12 e 16) que representam o comportamento dos gases, sendo extraídas de locais diferentes dos equipamentos e que mostram como a Teoria da Extensão é eficaz na resolução do diagnóstico, tanto para acertar, quanto para indicar erros na amostra.

As amostras de nº 8, 10 e 14 apresentaram resultados totalmente incoerentes com o tipo da falha, isso se deve ao fato de existir erros nos valores das amostras, pois o resultado errado também foi diagnosticado pela NBR 7274. Isto indica que existem códigos em que os limites permitem determinar uma solução, advertindo que a Teoria da Extensão tem foco nos problemas incompatíveis e contraditórios e os casos citados não representam este aspecto. Portanto, essas amostras foram descartadas.

Quanto ao nível de acerto entre os dois métodos, a Teoria da Extensão obteve êxito de 77 % enquanto a NBR apenas 61 % se houver a comparação entre razão da

Tabela 4.8: Falha térmica de média temperatura

n°	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Falha	Extenics	NBR
1	8800	64064	72128	95650	0	9	8,9	8
2	6709	10500	1400	17700	750	9	9	9
3	1100	1600	221	2010	26	9	9	9
4	290	966	299	1810	57	9	9	9
5	2500	10500	530	4790	6	9	8,9	8
6	1860	4980	0	10700	1600	9	9	N
7	860	1670	30	2050	40	9	9	9
8	150	22	9	60	11	9	4,5	5
9	400	940	210	820	24	9	9	9
10	6	2990	29990	26076	67	9	7	7
11	100	200	110	670	11	9	9	9
12	290	1260	231	820	8	9	9	9
13	1550	2740	816	5450	184	9	9	9
14	3910	4290	626	6040	1230	9	5	N
15	12705	23498	6047	34257	5188	9	4	N
16	1	8	8	100	6	9	9	9
17	300	700	280	1700	36	9	9	9
18	107	143	34	222	2	9	9	9

quantidade de acertos e o número de amostras. Se forem utilizadas apenas as amostras individuais a análise poderia ser feita de outra forma. A variação do índice λ de $[0.1,0.9]$ poderia representar o percentual de acerto, logo para uma amostra que os resultados indicassem na maioria da vezes uma falha em particular, por exemplo, obtivesse a solução $[0\ 0\ 0\ 9\ 9\ 9\ 9\ 9\ 9]$, em que a falha de n° 9 tem uma probabilidade maior de ocorrer, esta então seria a solução do problema. Mas isto é apenas uma outra forma de ver o problema e que mostra ser promissor o uso da Teoria da Extensão aplicado a AGD.

São mostrados através da Fig. 4.11, os resultados expressos por meio dos gráficos linha e de barras a diagnóstico feito para as quatro amostras selecionadas. A amostra de n° 2 é representada no primeiro gráfico de linhas e ocorreu devido a circulação de corrente entre a braçadeira de junção e o parafuso de conexão de um transformador

sem OLTC fazendo com que a temperatura do óleo fosse elevada. No gráfico de barras é possível ver que os gases 2 e 4 (metano e etileno) são os que apresentam maior proporção relativa e que geralmente estão associados a esse tipo de falha térmica.

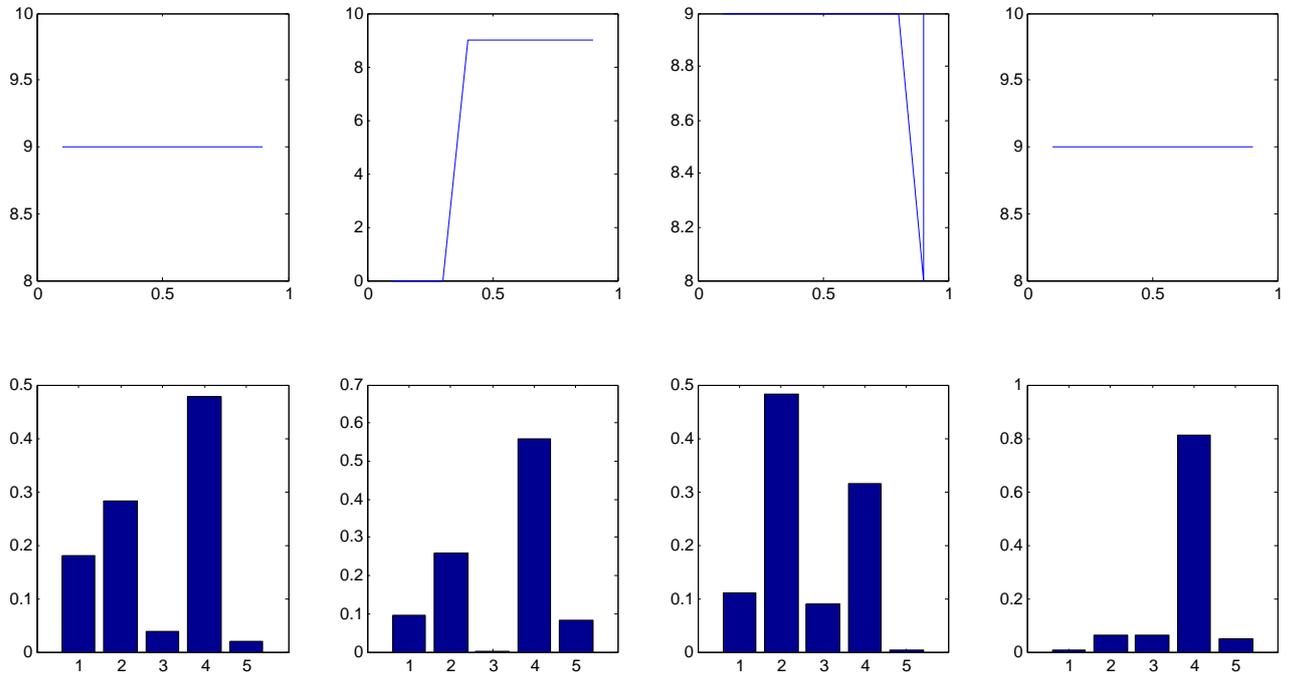


Figura 4.11: Gráfico de falhas (temperatura)

No segundo gráfico de linhas é apresentada a amostra de nº 6, no qual o resultado inicial e a falha de nº 1 e posteriormente o algoritmo encontra o resultado correto. A falha nº 9 dessa amostra ocorreu em função dos contatos da chave seletora de um transformador com OLTC estarem queimados e com isso ocorreu uma sobrecarga no equipamento conduzindo a temperatura interna a valores que produziram os gases falhas. O gráfico de barras representa a mesma condição de análise da amostra de nº 2 em que houve predominância dos gases 2 e 4.

O terceiro gráfico de linhas é da amostra de nº 12 de um transformador sem OLTC, no qual a falha térmica foi gerada devido uma má conexão nos enrolamentos do transformador. Inicialmente o resultado convergiu para a solução de nº 9, havendo a posteriori uma variação entre as falhas de nº 8 e 9. Pelo gráfico de barras é possível aceitar essa hipótese, pois os gases predominantes são os mesmos 2 e 4 (metano e etileno), contudo as proporções relativas de metano são superiores ao do etileno o que implica em falhas dessas natureza.

A última análise é da amostra de nº 16 que foi retirada de um reator com a presença de ponto quente nas buchas. Foi apontado através do diagnóstico a falha de nº 9 em todas as possibilidades geradas pela variação do λ , logo foi obtido com a aplicação da metodologia um acerto pleno. No gráfico de barras o gás em destaque é o de nº 4 (etileno) com uma proporção de 80 % e traços dos demais gases que indicam a falha térmica.

Todas as quatro amostras de gases foram obtidas de uma base confiável (IEC TC10) e com resultados comprovados. Contudo, o pretendido com esses exemplos é mostrar que a metodologia da Teoria da Extensão pode ser aplicada a diversos tipos de equipamentos que utilizam óleo mineral como isolante sem comprometer o diagnóstico.

4.2.3 Amostra de AGD da ELETRONORTE-MA

A última etapa de testes desse capítulo é o uso de dados reais de concessionárias. Foram utilizados dados da concessionária local (ELETRONORTE-MA) para dois autotransformadores de 200 MVA, 500 kV, Fases A e B, da subestação de São Luís II. Estes equipamentos foram escolhidos pela importância estratégica, por possuírem dados históricos para análise e por estarem sendo implantadas sondas para o monitoramento remoto de gases, o que facilitará o acompanhamento e diagnóstico on-line destas unidades.

Os primeiros ensaios foram realizados com os dados de gases disponibilizados pelo Centro de Tecnologia da Eletronorte (LACEN) [66] com ensaios de cromatografia de gases num total de 20 amostras do autotransformador da Fase A, no período de 2002 a 2007 e 26 amostras do autotransformador da Fase B, no período de 2001 a 2008, ambos equipamentos foram postos em operação em 1984.

Estes equipamentos não sofreram nenhum tipo de falha devido ao acompanhamento frequente a que foram submetidos, porém existe a indicação no diagnóstico proposto pela concessionária dos cuidados necessários para manter esta condição de operação. Assim, a aplicação da Teoria da Extensão para esses casos, atua na comparação entre o nível de acerto entre os dois métodos (*Extensics* x NBR) como ferramenta de diagnóstico de falhas incipientes.

São apresentadas através da Tabela 4.9, as 20 amostras do autotransformador LDAT701A (AT-autotransformador, 7-500kV, 01-primeiro equipamento, A-fase) com o resultado da análise de óleo dividida em falhas, extenics e NBR. Os procedimentos que foram realizados pela concessionária, quanto ao diagnóstico, observações e medidas que deveriam ser tomadas em cada caso foram usadas para verificar a consistência do método em precisar a solução do problema.

Tabela 4.9: Amostra de gases do transformador Fase A

n°	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Extenics	NBR
1	47	58	85	21	0	7	7
2	63	76	85	9	0	7	7
3	57	69	120	7	3	3	N
4	68	59	81	9	2	1	N
5	73	60	86	10	3	1	N
6	84	71	97	12	0	1	1
7	108	67	97	11	0	1	1
8	60	39	63	8	2	1	N
9	59	49	52	10	2	1,7	N
10	70	75	64	10	2	1,7	N
11	62	45	59	18	1	1	1
12	51	35	48	16	1	1	1
13	58	39	44	15	1	1	1
14	57	39	44	19	2	1	N
15	35	22	32	29	0	1	1
16	31	16	22	6	0	1	1
17	38	35	23	21	0	1	1
18	38	35	23	20	0	1	1
19	34	13	27	36	0	6	6
20	32	20	16	5	1	1	N

Com o uso da NBR foi encontrado um diagnóstico de 12 amostras das 20 apresentadas, isto representa um percentual de acerto bem baixo (60 %) indicando que as outras condições de falha teriam que ser diagnosticadas com o uso de técnicas auxiliares

e da experiência do especialista humano. No qual, como via de regra solicitaria outras amostras em períodos mensais ou semanais em função da proporção relativa de gases encontrada nas amostras. Com a aplicação da metodologia da Teoria da Extensão obteve-se um diagnóstico para cada uma das amostras, o que não representa um acerto pleno, pois esses dados passam ainda pela análise do especialista humano e não significa que tudo que foi diagnosticado pelo método proposto esteja correto, contudo já auxilia e norteia na solução do problema.

Na Fig. 4.12 são mostradas quatro amostras de gases, no qual é apresentado o diagnóstico através dos gráficos de linhas e as proporções relativas dos gases nos gráficos de barra, para uma análise subjetiva. Foram selecionadas as amostras de nº 3,4,9 e 19 onde estão presentes diversas condições de falhas para representar o uso da metodologia. O primeiro gráfico de linhas (amostra de nº 3, 01/08/07) obteve o diagnóstico para a falha de nº 3 que indica descarga parcial de energia de alta densidade (corona). O diagnóstico da concessionária foi a indicação de teor de acetileno que poderia provocar uma falha elétrica e a observação sugerida foi de inspecionar o equipamento. Pelo gráfico de barras pode-se observar que a maior proporção é do gás de nº 3 (etano) que inicialmente não representa uma falha térmica do tipo corona, onde o indicativo principal é o gás hidrogênio. Desta forma, a metodologia aponta que não há a condição de falha a priori, mas não descarta a possibilidade no futuro.

No segundo gráfico de linhas é apresentada a amostra de nº 4 (20/05/07), no qual a falha indicada foi a de nº 1, condição normal de operação. No gráfico de barras as proporções relativas com índice variando entre 30-40 % do total de ppm, são as dos gases 1,2 e 3 (hidrogênio, metano e etano) que ainda não são representativos para indicar uma falha térmica ou elétrica. A ação sugerida pela concessionária foi de manter o equipamento monitorado, uma vez que existem traços de acetileno que podem progredir para uma falha elétrica.

É representado através do terceiro gráfico de linhas a amostra de nº 9 (05/12/05), diagnosticada como falha múltipla envolvendo as condições de nº 1 e 7, condição normal e falha térmica de baixa temperatura (150°C - 300°C). Esta análise pode ser melhor compreendida com o uso do gráfico de barras, onde as proporções relativa dos gases 1,2 e 3 (hidrogênio, metano e etano) inicialmente não correspondem a uma condição de falha, mas pode progredir para uma falha térmica caso ocorra um aumento das proporções relativas do gás 4 (etileno) ou falha elétrica caso o aumento seja do gás 5 (acetileno).

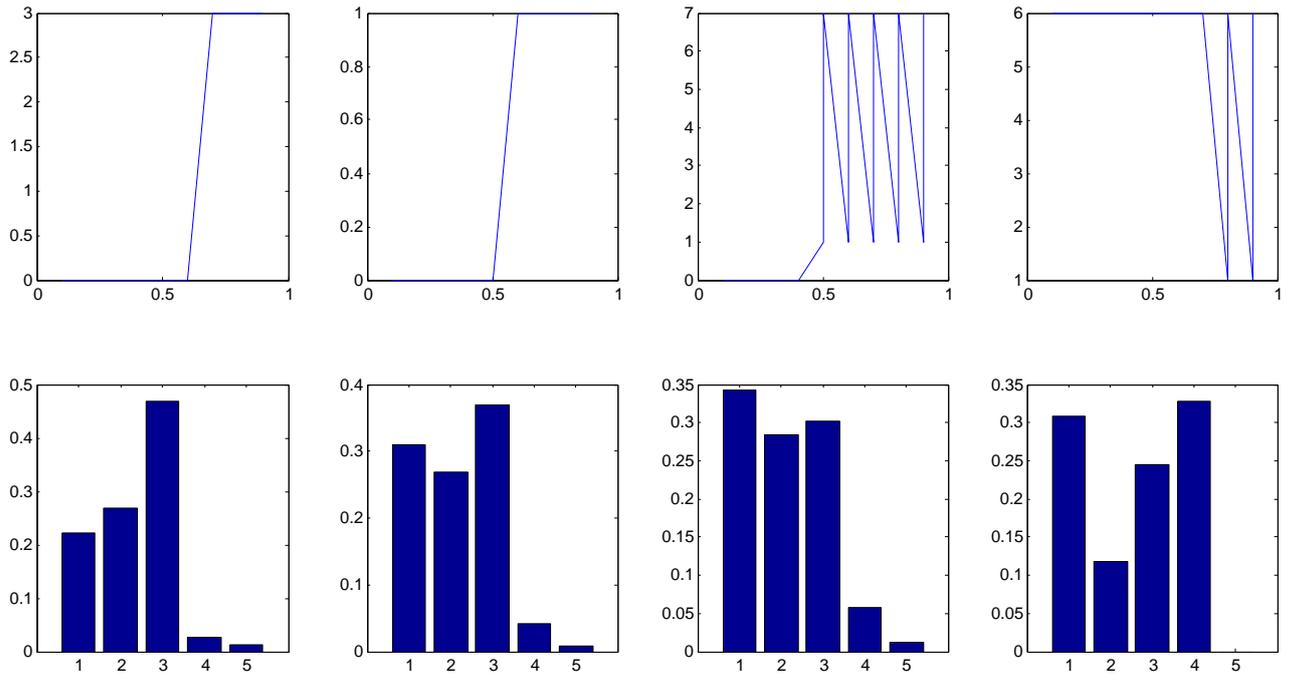


Figura 4.12: Gráfico de falhas do autotransformador Fase A

O último gráfico de linhas é da amostra de nº 19 (14/03/02), em que a falha encontrada foi a de nº 6 que representa uma falha térmica de baixa temperatura ($t < 150^{\circ}\text{C}$). O diagnóstico proposto com a aplicação da Teoria da Extensão foi indicar a priori a falha de nº 6 e a posteriori através dos valores obtidos a possibilidade da falha não ocorrer. Isto se apresenta devido ao grau de pertinência para esta falha estar localizado na periferia do domínio clássico e assim, qualquer erro durante a obtenção dos gases pode influenciar em um resultado divergente do observado. Pode-se observar pelo gráfico de barras que as maiores proporções relativas são dos gases 1,4 (hidrogênio e etileno) sendo que a presença do etileno, por si só já aponta a falha como sendo de origem térmica.

Por meio da Fig. 4.13 é apresentada a evolução dos gases (20 amostras) de 2002 a 2008 e as proporções em ppm para cada período. Observa-se um crescimento das proporções de gases como o hidrogênio de 40 ppm em 2002 para 110 ppm em 2006 e do etano de 30 ppm em 2002 para 120 ppm em 2007, além dos demais gases, metano, etileno e acetileno em menor proporção.

Houve uma contenção na produção do etileno e do acetileno que foram mantidos controlados durante todo esse período. O aumento significativo dos gases hidrogênio e etano devem ter ocorrido em função de períodos de sobrecarregamento do transformador, pois se tem o registro que o equipamento sofreu uma elevação do carregamento de apro-

ximadamente 120 MW para 130 MW nos anos de 2006 a 2008 e dependendo do nível de contaminação as concentrações dos gases podem ter sido alteradas. Outra causa associada seria o surgimento de transitórios produzidos a partir de remanejamento de cargas, afundamento de tensão, entre outros problemas relacionados a qualidade de energia.

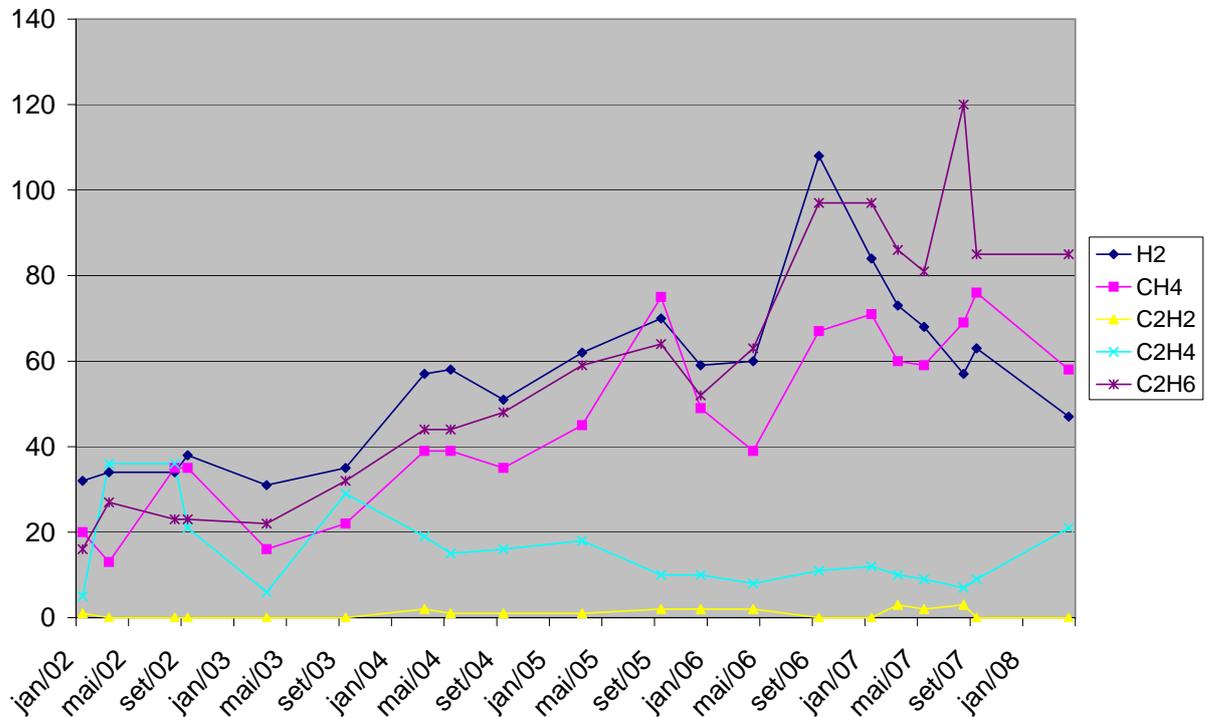


Figura 4.13: Histórico de gases do transformador Fase A

O próximo exemplo está organizado na Tabela 4.10, onde são registradas 26 amostras do transformador LDAT701B, 500 kV, 200 MVA, Fase B, com as proporções em *ppm* dos cinco tipos de gases falha e o diagnóstico obtido pela Teoria da Extensão e pela NBR. As amostras são do período de agosto de 2001 a fevereiro de 2008 e o nível de acerto usando a NBR foi de 69%, pois das 26 amostras só conseguiu diagnosticar 18.

No caso da Teoria da Extensão, todas as 26 amostras obtiveram resultado, contudo não significa que o diagnóstico esteja plenamente correto, uma vez que o algoritmo implementado procura por falhas incipientes e a NBR por falhas atuais. Isto faz com que durante o diagnóstico seja possível observar pela variação do λ as mudanças que permitem determinar uma falha.

Das 26 amostras foram selecionadas quatro com as condições de falhas conhecidas. Estas amostras são as de nº 2, 10, 14 e 18 e estão representadas no gráfico da Fig. 4.14, com o diagnóstico feito pela Teoria da Extensão.

Tabela 4.10: Amostra de gases do transformador Fase B

n°	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Extenics	NBR
1	118	31	36	10	0	1	1
2	373	16	21	6	0	2	2
3	262	43	29	8	0	1	1
4	107	35	30	9	0	1	1
5	685	23	20	8	0	2	2
6	150	25	18	8	0	1	1
7	631	31	22	9	0	2	2
8	3186	38	27	11	0	2	2
9	864	38	27	11	0	2	2
10	1113	24	3	13	0	4	N
11	1632	38	17	13	0	2	2
12	1846	22	41	24	0	2	2
13	262	23	19	16	0	2	2
14	2205	21	18	19	0	2	N
15	404	26	14	19	0	2	N
16	242	33	16	18	0	6	6
17	739	19	10	18	0	6	N
18	14	12	8	13	0	6	N
19	16	6	5	4	0	1	1
20	6	8	5	3	0	7	7
21	111	35	33	5	0	1	1
22	129	37	30	4	0	1	1
23	124	57	55	9	1	1	N
24	224	35	52	28	0	1	1
25	179	47	35	9	1	1	N
26	58	51	33	5	1	1,7	N

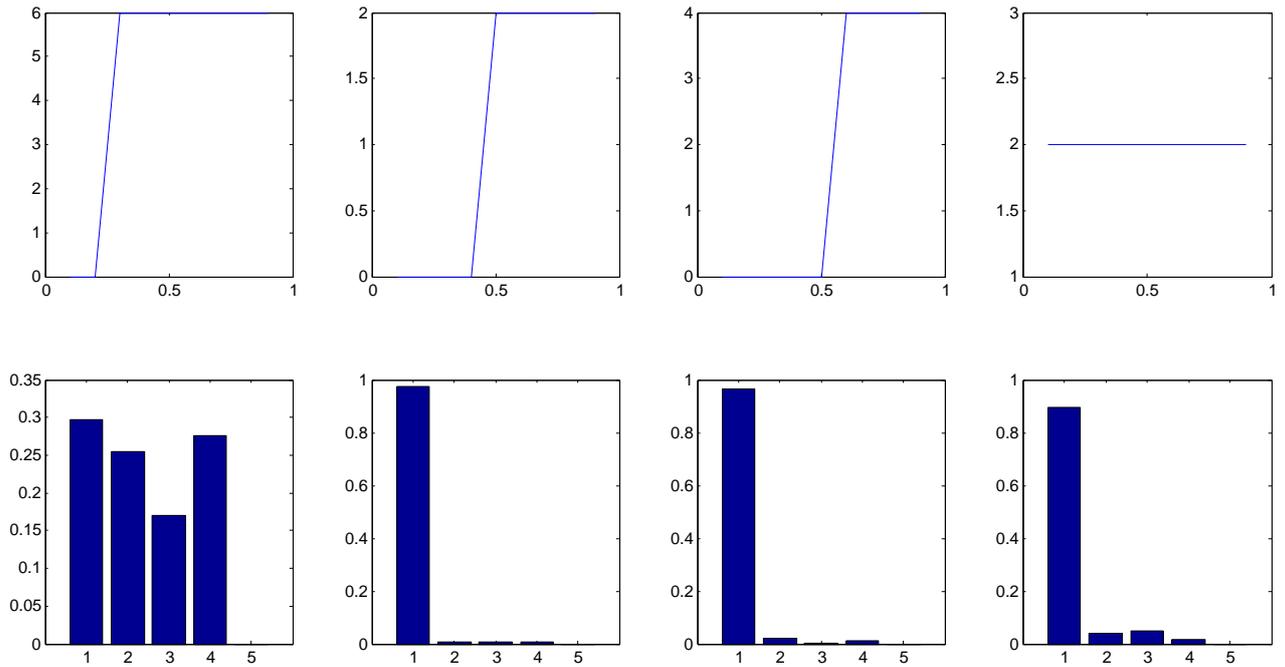


Figura 4.14: Gráfico de falhas do autotransformador Fase B

No primeiro gráfico de linha está a amostra de nº 18 obtida em março de 2003, no qual a falha indicada foi a de nº 6, falha térmica de baixa temperatura $t < 150^{\circ}\text{C}$. O diagnóstico apresentado pela concessionária indicou condição de operação normal, como pode ser visto na avaliação feita no início pela Teoria da Extensão, todavia esses valores mudam para a falha correspondente a medida que o índice λ é variado. A confirmação da falha incipiente pode ser analisada com o gráfico de barras, onde as concentrações relativas dos gases 1, 2, 3 e 4 (hidrogênio, metano, etano e etileno) apresentam valores abaixo de 30 % *ppm* que só podem caracterizar falha térmica.

No segundo gráfico de linhas está a amostra de nº 14 de setembro de 2004. A falha encontrada foi a de nº 2 do tipo descarga parcial de energia de baixa densidade (corona). Uma característica desse tipo de falha é a formação do gás 1 (hidrogênio) em proporções altas e traços dos demais gases. Neste caso o hidrogênio obteve um valor de 80 % de *ppm* na amostra, sendo diagnosticado pela Teoria da Extensão na quarta iteração ($\lambda = 0.4$). O diagnóstico da concessionária indicou defeito térmico de alta temperatura, com a repetição do ensaio para uma nova amostra em outubro de 2004 (um mês depois). O resultado da nova análise apontou a falha como sendo elétrica, isto comprova que o uso da Teoria da Extensão para indicação de falhas incipientes é promissor.

No terceiro gráfico está a amostra de nº 10, de dezembro de 2006. Para esta amostra a falha indicada foi a de nº 4, descarga de baixa energia (arco). As proporções

relativas dos gases 1, 2 e 4 (hidrogênio, metano e etileno) são maiores do que a da amostra de nº 14, logo o resultado também difere, pois ocorre uma evolução na concentração dos gases e conseqüentemente uma mudança de efeito corona para início de arco. No diagnóstico da concessionária o resultado foi para falha elétrica do tipo descarga parcial de alta energia e a medida foi de realizar inspeção e testes no equipamento.

No último gráfico de linhas a amostra foi a de nº 2, de setembro de 2008. A falha diagnóstica foi de nº 2, falha elétrica do tipo descarga parcial de energia de baixa densidade (corona). Este foi o mesmo diagnóstico feito pela NBR, porém para a Teoria da Extensão a falha se apresenta em dois aspectos: representa que a falha está ocorrendo ou que ainda vai ocorrer. Os indicativos obtidos pela concessionária vão no sentido de monitorar as concentrações relativas do gás 1 (hidrogênio) com constantes inspeções no equipamento.

Na Fig. 4.15 é apresentado o histórico de gases do autotransformador, Fase B, obtido entre os anos de 2001 e 2008. Nota-se que durante todo o período em análise o hidrogênio é que tem apresentado maior concentração relativa de gás, com valores registrados entre 100 a 3000 *ppm*. Esta alta taxa é um indicativo que o equipamento está constantemente em processo de contaminação do óleo por umidade, por isso o acontecimento de falhas elétricas de energia de baixa densidade (corona).

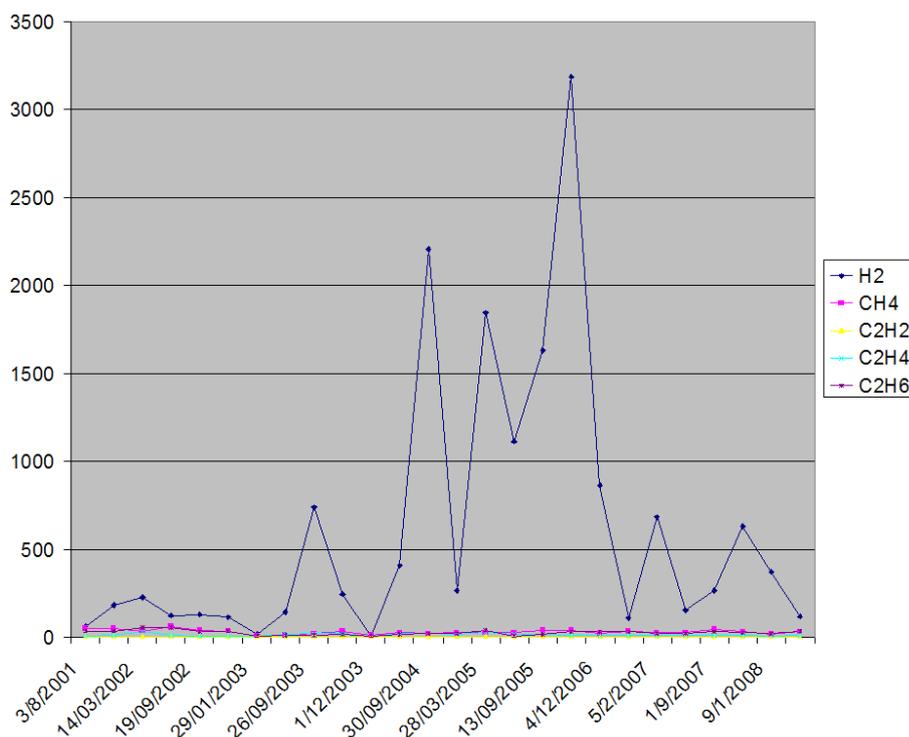


Figura 4.15: Histórico de gases do transformador Fase B

Caso não sejam tomadas medidas corretivas, como a secagem do óleo, o equipamento poderá sofrer sérias avarias e ter um comprometimento acelerado de perda de vida útil, uma vez que as concentrações de contaminantes no óleo podem levar a falhas mais graves como a formação de arcos e evoluir para um quadro de perda total do transformador.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO PROPOSTO

Algumas considerações sobre a aplicação da Teoria da Extensão no diagnóstico de falhas foram levantadas durante o desenvolvimento do trabalho e merecem uma discussão. Essas considerações não estão diretamente voltadas ao questionamento do método, mas fazem parte do contexto e estão relacionadas aos resultados e eficiência do diagnóstico através da análise do gás dissolvido.

Pode-se dizer que a escolha da Teoria da Extensão envolve além dos fatores principais (tratar contradições e incompatibilidades) a facilidade de implementação computacional. Enquanto os outros métodos que utilizam *fuzzy*, redes neurais, etc. exigem uma maior grau de complexidade com a construção do algoritmo, desenvolvimento, treinamento e criação das bases de regras, a Teoria da Extensão é mais prática podendo ser modificada posteriormente, se necessário, para cada caso em particular.

Estas facilidades de desenvolvimento implicam em menor esforço computacional e conseqüentemente ganhos significativos para aplicações em tempo real e em estações de multi-usuários. Destaca-se que as amostras utilizadas para testes são obtidas de bancos de ensaios *off-line*. Contudo, se fosse realizada uma comparação entre os sistemas de diagnósticos que utilizam técnicas inteligentes e a aplicação da Teoria da Extensão, os ganhos seriam o menor tempo de execução e a eficiência do diagnóstico, uma vez que poucos dados de amostras de gases mesmo que contaminadas ainda indicam uma falha.

As considerações sobre esforço computacional, complexidade e comparação entre outros métodos, não é ainda um objeto de interesse a ser discutido nos trabalhos analisados como em [17][25], possivelmente por se trabalhar com amostras *off-line* em que o tempo de análise em segundos ou minutos não comprometem o diagnóstico e por isso

não são considerados de extrema importância. Todavia, para aplicações que envolvem monitoramento *on-line*, a observação sobre essas considerações devem ser respeitadas.

4.4 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foi abordada a implementação prática da Teoria da Extensão com a descrição do algoritmo na forma das etapas de transformação da NBR 7274 (1999) em elemento matéria e a construção dos domínios que formam os conjuntos extensos. Posteriormente foi feito um estudo de caso com a aplicação da metodologia em três módulos.

O primeiro módulo é constituído da replicação de dados de ensaios de óleo encontrados em artigos e periódicos internacionais em que foram aplicadas outras metodologias de diagnóstico. O segundo composto de dados de ensaios de óleo obtido através da norma IEC TC10 que é uma base de dados de ensaios. O terceiro com dados de ensaios de óleo obtido da concessionária local (ELETRONORTE-MA).

Os testes realizados nos três módulos foram comparados em termos de porcentagem de acerto quando se usa a NBR e a Teoria da Extensão. Em conjunto foram incluídos os gráficos de falha para os nove tipos de resultados apresentados para cada amostra, frisando que essas nove condições apresentadas representam a evolução dos gases para falhas incipientes. Isto é possível com a variação de $[0.1 \ 0.9]$ do índice λ que representa a mudança sofrida pelo gás em condições de contaminação, sobrecargas (aquecimento do óleo), etc..

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

5.1 CONCLUSÕES

Neste Capítulo são apresentadas as principais conclusões referentes a esta Dissertação. Como já referenciado durante o trabalho, para os Gestores de Risco e Companhias de Seguros, o transformador é um dos equipamentos de mais alto risco de falha dentro de uma usina de energia elétrica, devido à grande quantidade de óleo que fica em contato com elementos submetidos à alta tensão. Portanto, é necessário que as concessionárias tenham acompanhamento contínuo dos processos de operação e manutenção, para poder diagnosticar as possíveis situações que possam provocar falhas de operação, que particularmente ocorrem no isolamento do equipamento.

Por via disto, as técnicas de análise e diagnóstico de falhas incipientes em transformadores têm ganho novos impulsos, no que se refere a melhorias e desenvolvimento, pois os métodos tradicionais apresentados nas normas ou publicações, e ainda utilizados por concessionárias mostram-se pouco eficazes para fornecerem diagnósticos confiáveis aos operadores do sistema. Isto permite o desenvolvimento de novas metodologias utilizando técnicas inteligentes associadas a este propósito.

Neste trabalho de Dissertação foi feito a aplicação da norma NBR 7274 (1999) utilizada pelas concessionárias do setor elétrico na análise do gás dissolvido (AGD), com à técnica da Teoria da Extensão referenciada na literatura. O objetivo da ferramenta foi suprir as deficiências do método convencional, quando utilizado de forma isolada.

O primeiro passo do processo de diagnóstico consistiu na utilização do método de Rogers modificado, do projeto de revisão da NBR 7274 (1999) e a aplicação da Teoria da Extensão para transformar as falhas em elemento matéria e os intervalos das falhas em domínios do conjunto extenso, obtendo um vetor com três graus de dependência para cada falha. De posse desse vetor, algumas regras foram aplicadas para a combinação destes resultados. Uma das regras foi a submissão à análise *fuzzy* usando a média max-min para

encontrar um único grau de dependência que representasse a falha. Isto em conjunto com a aplicação da Teoria da Extensão para o caso brasileiro consistiu na principal contribuição deste trabalho.

Individualmente, o método de Rogers modificado foi implementado para os três módulos de dados considerados. Porém, não se obteve boas taxas de acerto nos diagnósticos. Apesar do desempenho insatisfatório, esta Norma entre outras são comumente utilizadas e possuem grande aceitação nas empresas do setor elétrico, e por isso não devem ser desconsideradas.

Com a aplicação da Teoria da Extensão para os mesmos casos, obteve-se um grau de acerto bem superior, principalmente por que o foco deste método está em encontrar as soluções para os casos que a norma não consegue identificar.

O uso do operador *fuzzy* max-min ajuda de forma significativa no cálculo do valor médio para construção do grau de dependência que indica a falha como simples ou múltipla. A variação do índice λ do valor médio *fuzzy* max-min permite deslocar as relações dos gases usados no método de Rogers, dentro dos domínios clássicos e de extensão, dessa forma é possível perceber o que acontece quando um gás aumenta ou diminui em proporção relativa e muda de um domínio para outro, alterando conseqüentemente o tipo da falha.

Analisando a Teoria da Extensão aplicada ao diagnóstico de falhas é válido ressaltar que mesmo com as incertezas contidas nos processos de obtenção de dados de geração de gases (erros de medição e de contaminação na coleta de óleo), aliados às diferenças entre os transformadores, como: classes de tensão, volume de óleo, aspectos construtivos, fatores ambientais envolvidos, dentre outros que impossibilitam o desenvolvimento de uma ferramenta com 100 % de acerto, os resultados obtidos foram bastantes promissores e validam o uso da metodologia utilizada neste trabalho.

É relevante esclarecer que a utilização desta metodologia para o diagnóstico de falhas não torna inválida de forma alguma o uso das Normas nacionais e internacionais, já há bastante tempo utilizadas pelas empresas do setor elétrico. A idéia principal é fornecer outros subsídios que complementem o diagnóstico.

5.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Como sugestões para uma continuidade deste trabalho propõe-se:

- Obtenção de mais amostras de gases com diagnósticos confirmados, para a avaliação do desempenho da metodologia, bem como para a avaliação do desempenho da função *fuzzy*;
- Incorporar na análise as proporções relativas dos gases e alguma forma de conhecimento de especialistas em AGD;
- Fazer o cruzamento entre outras técnicas de diagnóstico como os métodos previstos na IEEE e IEC a fim de incorporar mais variáveis de interesse;
- Utilizar dados históricos e aplicar metodologia específica para cada família de transformadores;
- Desenvolver modelos que considerem o efeito da umidade e a temperatura do óleo no processo de degradação da celulose, além de outros aspectos físico-químicos;
- Estender a metodologia para equipamentos (pequeno e grande volume de óleo) como disjuntores, buchas, reatores e outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DOMINELLI, D.; RAO, A. and KUNDUR, P., (2005). Life Extension and Condition Assessment. **Spectrum Magazine**. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8014/34233/01632451.pdf?arnumber=1632451>.
05 de janeiro de 2007.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 191 de 12 de dezembro de 2005**. Disponível em: <http://aneel.gov.br/cedoc/bren2005191.pdf>. Acesso em: 21 de abril de 2007.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 513 de 16 de setembro de 2002**. Disponível em: <http://aneel.gov.br/cedoc/bren2002513.pdf>. Acesso em: 21 de abril de 2007.
- [4] Projeto NBR 7274 (1999). **Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço, projeto de revisão da NBR 7274/ 1982**.
- [5] SERGI-Société Générale d'Etudes et de Réalisations Industrielles (2008). **Transformer Protector**. V Workspot on Power Transformer, 15-18 abril, Belém-PA.
- [6] KELLY, J. J., (1980) Transformer Fault Diagnosis by Dissolved-gas Analysis. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 16, pp. 777-782.
- [7] HILL, D. J. T.; LE, T. T.; DARVENIZA, M.; SAHA, T. K., (1995) A Study of Degradation of Cellulosic Insulation Materials in a Power Transformer Part 1: Molecular Weight Study of Cellulose Insulation Paper. **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 48, pp. 79-87.
- [8] ALI, M.; EMSLEY, A. M.; HERMAN, H.; HEYWOOD, R. J., (2001) Spectroscopic Studies of the Ageing of Cellulosic Paper. **Polymer**. Vol. 42, pp. 2893-2900.
- [9] GAFVERT, U.; (1996) Condition Assessment of Insulation Systems: Analysis of Dielectric Response Methods. **In: Nordic Insulation Symposium, NORD IS 96**. Norwegian Univ. Sci. & Technol., Trondheim, Norway, pp. 1-19.

- [10] GAFVERT, U.; ADEEN, L.; TAPPER, M.; GHASEMI, P.; JONSSON, B.; (2000) Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers. **In: Proc. 6th Intern. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials Z. ICPADM.** Vol. 2, pp. 825-830.
- [11] HAO X. and CAI-XIN, S.; (2007). Artificial Immune Network Classification Algorithm for Fault Diagnosis of Power Transformer **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 22, nº 2, p. 930-935.
- [12] WENQING, Z.; YONGLI, Z. (2006). Rough Set Theory for Data Mining for Fault Diagnosis on Power Transformer. **IEEE Region 10 Conference, TENCN**, november 14-17, pp. 1-4.
- [13] HAO, X.; WEIGUO, L.; GUANHUI, C.; HUIMIN G.; (2006). An Improved Power Transformer Diagnosis System for Incipient Fault Based on Fuzzy Rough Set Theory. **International Conference on Power System Technology, PowerCon**, 22-26 de outubro, pp. 1-8.
- [14] ZHENG-HONG, P.; BIN, S; (2006) Application of Data Mining Technique Based on Grey Relational Analysis in Oil-Immersed Power Apparatus Fault Diagnosis. **International Conference on Power System Technology, PowerCon**, 22-26 de outubro, pp. 1-4.
- [15] HUANG, Y.; YONGQUAN, Y. and LINGZAHNG; (2005). Extension Control Algorithm Using Extesion Set In Control System **In: Proc. 3th Intern. Conf. on Information Technology and Application ICITA.** Vol. 1, pp. 407-410 .
- [16] WANG, M-H. and YUNG-HO, C.; (2005). Application of Extension Theory to PD Pattern Recognition in High-Voltage Current Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 20, nº 3, p. 1939-1946.
- [17] ZIRBES, R.; (2003). Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamento de Papel Impregnado com Óleo Mineral. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica**, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [18] OOMMEN, T. V.; (1991) On line moisture sensing in transformer. **Electrical Electronics Insulation Conference.**, Boston, Outubro.

- [19] GUPTA, B. K. (1998). Direct Determination of Moisture in Solid Oil-Paper Insulation. **presented at IEEE Intern. Sympos. Electr. Insulat.**, Arlington, Virginia, USA, pp. 583-586.
- [20] NEIMANIS, R.; LENNHOLM, L.; ERIKSSON, R. (1999). Determination of Moisture Content in Impregnated Paper Using Near Infrared Spectroscopy. **IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr.. Phenomena**, pp. 162-165
- [21] FARGON Engenharia e Indústria LTDA. Disponível em: http://www.fargon.com.br/info_3.htm. Acesso em: 5 janeiro de 2008.
- [22] EMSLEY, A. M. E STEVENS, G. C. (1994). Review of Chemical Indicators of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers. **IEE Proc. Sci. Measur. Techn..** Vol. 141, pp. 324-334.
- [23] IEEE Std C57.104-1991 (1991). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.
- [24] HAUPERT, T. J. and JAKOB, F. (1988). Review of the Operating Principles and Practice of Dissolved Gas Analysis. Philadelphia: ASTM.
- [25] MORAIS, D. R.; (2004), Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.
- [26] ZIRBES, R., ROLIM, J. G., ZÜRN, H. H.; (2005) Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamento de Papel Impregnado com Óleo Mineral. **Revista Controle e Automação.**, Vol.16, nº 3, 2005, Julho, Agosto e Setembro.
- [27] IEC Publication 605 (1999). Mineral oil-impregnated electrical equipment in service- Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis, March 1999.
- [28] DUVAL, M. e DE PABLO, A. (2001). Interpretation of Gas-In-Oil Analysis using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol. 17, No. 2, pp. 31-41.
- [29] DUVAL, M. (1989). Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol. 5, No. 6, pp. 22-27

- [30] LAPWORTH, J. (2002). A Novel Approach Scoring System for Integrating Dissolved Gas Analysis Results into a Life Management System, **IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul.**, pp. 137-144.
- [31] MILASCHI, M; (1984). Manutenção De Transformadores em Líquido Isolante. Editora Edgard Blücher LTDA.
- [32] MORAIS, R. M. e ENGELSTEIN, E. (1990). Thermal Ageing of Oil-paper Insulation, **IEEE 10th Intern. Conf. Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids**, ICDDL, pp. 495- 499.
- [33] PAHLAVANPOUR, B.; MARTINS, M. A.; DE PABLO, A. (2002). Experimental Investigation into the Thermal-ageing of Kraft Paper and Mineral Insulating Oil, **IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul.**, Boston, MA, USA, pp. 341-345.
- [34] HILL, D. J. T. ; LE, T. T.; DARVENIZA, M.; SAHA, T. K. (1996). A Study of Degradation in a Power Transformer-Part 3: Degradation Products of Cellulose Paper Insulation, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 51, pp. 211-218.
- [35] HILL, D. J. T.; LE, T. T.; DARVENIZA, M.; SAHA, T. K. (1995). A Study of Degradation of Cellulosic Insulation Materials in a Power Transformer Part 1: Molecular Weight Study of Cellulose Insulation Paper, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 48, pp. 79-87.
- [36] ALI, M.; ELEY, C.; EMSLEY, A. M.; HEYWOOD, R.; XIAO, X. (1996). Measuring and Understanding the Ageing of Kraft Insulating Paper in Power Transformers. **IEEE Electr. Insul. Mag.**. Vol. 12, No. 3, pp. 28-34.
- [37] SHROFF, D. H. e STANNETT, A. W. (1985). A Review of Paper Ageing in Power Transformers, **IEE Proc.**, part C, Vol. Vol. 132, pp. 312-319.
- [38] UNSWORTH, J. e MITCHELL, F. (1990). Degradation of Electrical Insulating Paper Monitored with High Performance Liquid Chromatography, **IEEE Trans. Electr. Insul.**, Vol. 25, pp. 737-746.
- [39] IEC 61198 Mineral Insulating Oils (1993). Methods for the Determination of 2-Furfural and Related Compounds.

- [40] WISZNIEWSKI, A. and KASZTENNY, B.; (1995). A Multi-Criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 10, n° 4, p. 1786-1792.
- [41] KASZTENNY, B.; ROSOŁOWSKI, E.; IZYKOWSKY, J. et al.; (1998). Fuzzy Logic Controller for On-load Transformer Tap Changer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 13, n° 1, p. 164-170.
- [42] ZHANG, Y.; DING, X.; LIU, Y. et al.; (1996). An Artificial Neural Network Approach to Transformer Fault Diagnosis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 11, n° 4, p. 1836- 1841.
- [43] GUARDADO, J. L.; NAREDO, J. L.; MORENO, P. et al.; (2001). A Comparative Study of Neural Network Efficiency in Power Transformers Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 16, n° 4, p. 643-647.
- [44] HONGZHONG, MA; ZHENG, L., JINGDONG, P.; ZHANG, L. (2005). Diagnosis of Power Transformer Faults Based On Fuzzy Three-Ratio Method. **The 7th International Power Engineering Conference IPEC**, november 29 december 2, p. 456-460.
- [45] SU, Q.; MI, C.; LAI, L. L. et al.; (2000). A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 15, n° 2, p. 595-598.
- [46] HONG-TZER, Y. and CHIUNG-CHOU, L.; (1999). Adaptative Fuzzy Diagnosis System for Dissolved Gas Analysis of Power Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 14, n° 4.
- [47] ;SURYA KAIAVATHI, M.; RAVINDRANATH REDDY, B.; SINGH, B. P.; (2005). Transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic and Neural Network. **Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP**, 16-19 de outubro, pp. 486-489.
- [48] CARDOSO JR., Ghendy; (2003). Estimação da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialistas Realizada em Nível de Centro de Controle. **Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica**. Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [49] YANG, JI; XING, Y.; WANG, Y.; YANG, L. (2004). Belief Network Classifier for Evaluation of DGA Data of Transformers. **IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul.**, Indianapolis, USA, september 19-22, pp. 78-80.
- [50] EKIRAN, H.; MOHSIN, M. M.; SATYAPRAKASH (2001). Transformer Insulation Condition Monitoring Using Artificial Neural Network. **IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics.**, june 25-29, Eindhoven, the Netherlands, pp. 295-298.
- [51] MIRANDA, V. and CASTRO, A. R. G.; (2005). Improving the IEC Table for Transformer Failure Diagnosis With Knowledge Extraction From Neural Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 20, n° 4, p. 2509-2516.
- [52] ZADEH, L. A.,(1965). Fuzzy sets: information and control. p. 338-353.
- [53] RUSSELL, B.,(2007). Introdução a Filosofia Matemática. Rio de Janeiro: Jorge Zahar. ed., 2007.
- [54] KLIR, G. J.; YUAN B.; 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- [55] HUANG, S.; LI, X.; HE, Z; (2000). Comments on Extension engineering Method. **Chinese Science Bulletin**, vol. 45, n° 1, p. 383-384.
- [56] B, He and JUN, C.; (1997). Research Outline on Extension Mathematics. **ACM SIGIDE Bulletin**, vol. 22, n° 3.
- [57] WANG, M-H.; (2004). Application of extension theory to vibration fault diagnosis of generator sets. **IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, vol. 151, n° 4, pp. 503-508.
- [58] YONGQUAN, YU; YING, H.; MINGHUI, W.; (2005). The Related Matter-Elements in Extension Detecting and Application. In: **Proc. 3th Intern. Conf. on Information Technology and Application ICITA**. Vol. 1, pp. 411-414 .
- [59] YIJING, JU; YONGQUAN, Yu; and CAI Wen; (2005). Extension Set and the Restricting Qualifications onf Matter-elements' Extension. In: **Proc. 3th Intern. Conf. on Information Technology and Application ICITA**, Vol. 1, pp. 395-398.

- [60] DAVID K. W. and CAI WEN; (1997). Treating Non-compatibility Problem from Matter Element Analysis to Extenics. **ACM SIGIDE Bulletin**, vol. 22, nº 3.
- [61] QINHUA, Zhu; YONGQUAN, Yu; and CAI Wen; (2005). Extension Set and the Research of the Extension ADD TRansformation. **In: Proc. 3th Intern. Conf. on Information Technology and Application ICITA**, Vol. 1, 2005, pp. 399-402.
- [62] WANG, J.; (2001). Extension Set Theory, Extension Engineering Method and Extension System Control. **Academic Open Internet Jornal**, vol. 5.
- [63] WANG, MANG-HUI. (2003). A Novel Extension Method for Transformer Fault Diagnosis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 18, nº 1, p. 164-169.
- [64] LIMIN, Z.; ZHENG, L.; HONGZHONG, M.; JU, P.;(2005). Power transformer fault diagnosis based on extension theory. **Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS**. september 27-29, Vol. 3, pp. 1763-1766.
- [65] DRIANKOV, D.; HELLENDORRN, H. and HEINFRANK, M.:(1996). An Introduction to Fuzzy Control. Berlin: Springer-Verlag 2ed., 1996.
- [66] Centro de Tecnologia da Eletronorte (SIGLACEM). Disponível em: <http://webserver.eln.gov.br/siglacenweb>. Acesso em: 5 janeiro de 2008.
- [67] CARDOSO, P. M.; (2005). Adaptação de um Sistema de Medição de Gases Dissolvidos em Óleo Mineral Isolante para Monitoração de Multiplos Transformadores de Potência. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.
- [68] DUVAL, M. and DEPABLO, A. (2001), Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 17, no. 2, pp.31-41.

APÊNDICE

Artigos decorrentes desta Dissertação

- Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência utilizando Teoria da Extensão. Workshop on Power Transformer (V WORKSPOT), 15-18 abril 2008, Belém-PA.
- Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência usando a Teoria da Extensão. Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON), 17-20 agosto 2008, Poços de Caldas-MG.
- Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência utilizando a Teoria da Extensão. Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (X SEPOPE), maio 2009, Belém-PA.

Artigos publicados durante a Dissertação

- Avaliação em Tempo Real da Carga Admissível para Transformadores de Potência. Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (VII CLAGTEE), 22 a 25 de outubro de 2007, Valparaiso-CHILE.
- VITRAN: Sistema Computacional para a Avaliação das Condições de Carga Admissíveis e Perda de Vida Útil de Transformadores de Dois e Três Enrolamentos. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IV CITENEL), 17 a 19 de setembro de 2007, Araxá-MG.
- Avaliação em Tempo Real da Carga Admissível para Transformadores de Potência. Workshop on Power Transformer (V WORKSPOT), 15-18 abril 2008, Belém-PA.
- Estudo de Perda de Vida Útil e Adicional Financeiro em Transformadores de Potência utilizando o software VITRAN. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 27 a 30 de abril de 2008, Belo Horizonte-MG.

-
- Estudo de Caso de Sobrecarga Admissível em Transformadores de Potência. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 27 a 30 de abril de 2008, Belo Horizonte-MG.

ANEXO

RESTRIÇÕES DO ELEMENTO MATÉRIA

1. Restrição de superioridade

A restrição de superioridade ou limite superior do elemento matéria é um conceito desenvolvido para determinar a formação dos domínios os quais pertence um elemento em função do grau de qualidade que este apresente.

Suponha-se que X_0 representa o conjunto dos elementos com o grau de qualidade de M qualquer e X o conjunto dos elementos que não possuem nenhuma qualidade, mas que podem mudar para X_0 . Estas mudanças ocorrem dentro do universo de medições U , onde X_0 é chamado de domínio clássico e X de domínio da extensão. Esses elementos (X_0 e X), servem para descrever o grau de qualidade de um elemento u no universo U . Para isso é definido uma variável K_{X_0} que representa o valor da função de dependência (será abordado a seguir), sendo que este valor é chamado de grau de qualidade de u em relação ao grau de qualidade de M .

A determinação da restrição de superioridade na extensão do elemento matéria é descrita através das seguintes considerações:

- 1) definição das qualidades - é feita uma avaliação de acordo com os procedimentos tecnológicos, econômicos e sociais necessários para resolver o problema prático e são definidas as qualidades $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, onde $M_i = (c_i, v_i)$ é um par formado pela característica (c) e o valor (v) de um objeto N do elemento matéria ($i=1,2,\dots,n$).
- 2) determinação dos pesos - a avaliação dos pesos de um objeto N_j com ($j=1,2,\dots,m$) é usada para expressar a importância de cada qualidade. O indexador lambda (Λ) é usado para simbolizar uma qualidade que deve ser satisfeita. Para outras qualidades são dados diferentes pesos, os quais são números reais entre $[0,1]$ de acordo com a importância da qualidade. Os pesos são simbolizados por $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ onde $\alpha_{i_0} = \Lambda$, logo,

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \quad (\text{ANEXO.1})$$

- 3) avaliação inicial - são eliminados todos os objetos que não satisfazem as qualidades requeridas. Tem-se então, M_1, M_2, \dots, M_m qualidades que satisfazem a operação.
- 4) função de dependência e cálculo do grau de qualidade - suponha-se que $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, onde $M_i = (c_i, v_i)$, $i=(1,2,\dots,n)$ é o conjunto de avaliação das qualidades e $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ os pesos, então é construído a função de dependência em relação a $X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0n}$.

- 5) condição 1 - função de dependência em relação a X_{0i} ,

$$K_i(x) = \frac{\rho(x, X_{0i})}{|X_{0i}|}, (i = 1, 2, \dots, n). \quad (\text{ANEXO.2})$$

- 6) condição 2 - função de dependência em relação a $X_{0i} \subset X_i$,

$$K_i(x) = \frac{\rho(x, X_{0i})}{\rho(x, X_i) - \rho(x, X_{0i})}, (i = 1, 2, \dots, n). \quad (\text{ANEXO.3})$$

Isto indica que o valor da função de dependência do objeto N_j em função da qualidade M_i é $K_i(N_j)$. O grau de qualidade de cada objeto N_1, N_2, \dots, N_n será $K_i = (K_i(N_1), K_i(N_2), \dots, K_i(N_n))$, $(i=1,2,\dots,n)$.

- 7) normalizar o grau de qualidade:

$$k_{ij} = \begin{cases} \frac{K_i(N_j)}{\max K_i(x)}, K_i(N_j) > 0 & \text{se } x \in X_0, \\ \frac{K_i(N_j)}{\max K_i(x)}, K_i(N_j) < 0 & \text{se } x \notin X_0, \end{cases} \quad (\text{ANEXO.4})$$

$(i=1,2,\dots,n)(j=1,2,\dots,m)$. Normalizando o grau de qualidade de cada objeto N_1, N_2, \dots, N_n em função de M_i , tem-se $K_i = (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{im})$, $(i=1,2,\dots,n)$.

- 8) calcular o grau de superioridade - com a normalização do grau de qualidade de cada N_1, N_2, \dots, N_n em função de M_1, M_2, \dots, M_n , então,

$$K(N_j) = \begin{bmatrix} k_{1j} \\ k_{2j} \\ \vdots \\ k_{nj} \end{bmatrix}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{ANEXO.5})$$

O grau de superioridade do objeto N_j será da forma:

$$C(N_i) = \alpha K(N_j) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \begin{bmatrix} k_{1j} \\ k_{2j} \\ \vdots \\ k_{nj} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \alpha_i k_{ij}, (j=1,2,\dots,m) \quad (\text{ANEXO.6})$$

De modo geral, pode-se dizer que, se $C(I) > 0$ a probabilidade da solução do problema ser encontrada é bem maior; porém se $C(I) < 0$, existe uma pequena chance de êxito. Uma solução ótima para o problema que envolve contradição é quando se tem mais ganhos do que perdas, ou seja, $C(N_j) > 0$. Como os conjuntos extensos podem descrever essas mudanças, isto permite que as vantagens e desvantagens de um objeto possam ser julgadas de um ângulo diferente, principalmente quando se introduz um parâmetro de tempo (t).

2. Restrição de verdadeiro e falso

No processo de pesquisa e diagnóstico a informação obtida pode ser do tipo verdadeiro ou falso. Esta informação pode ser escrita na forma de elemento matéria. Porém, quando se utiliza a teoria da extensão para resolver problemas de contradição deve ser considerado se o elemento matéria é verdadeiro ou falso e isto pode ser feito através das seguintes regras:

- 1) Dado um elemento matéria $R=(N,c,v)$, se $N \in \mathcal{L}(N)$ e $c(N)=v$, então o elemento matéria $R=(N,c,v)$ é verdadeiro, sendo escrito como $R@$; se $N \notin \mathcal{L}(N)$ ou $c(N) \neq v$, então o elemento matéria é falso e escrito como $R\bar{@}$.
- 2) Dado um elemento matéria $R(t)=(N(t),c,v)$, se $N(t_0) \in \mathcal{L}(N)$ e $c(N(t_0)) = v$, então o elemento matéria $R(t)=(N(t),c,v)$ é verdadeiro no tempo $t = t_0$; se $N(t_1) \notin \mathcal{L}(N)$ ou $c(N(t_1)) \neq v$, então o elemento matéria é falso no tempo $t = t_1$.
- 3) Dado um domínio V_0 e um elemento matéria $R=(N,c,v)$ o conjunto extenso é do tipo \tilde{V}_0 com V_0 positivo. Assim, $K_{\tilde{V}_0}(v)$ é o grau que classifica o elemento matéria $R=(N,c,v)$ como verdadeiro ou falso. Se $N \in \mathcal{L}1(N)$, então $R=(N,c,v)$ é verdadeiro para $K_{\tilde{V}_0}(v) > 0$; se o elemento matéria é falso, então $K_{\tilde{V}_0}(v) < 0$. Para um resultado em que $K_{\tilde{V}_0}(v) = 0$, ambos os casos verdadeiro e falso podem ocorrer.

Uma informação falsa não deve ser usada quando se pretende resolver um problema de contradição, portanto deve-se ter cuidado em construir um elemento matéria verdadeiro, no qual $K_{\tilde{V}_0}(v) \geq 0$.

3. Restrição de compatibilidade

Para entender como atua a restrição de compatibilidade no elemento matéria é necessário saber das definições de “conjugado característico” e do “grau de compatibilidade”.

Definição de conjugado característico: se os elementos c_1 e c_2 descrevem as características de partes de um conjugado, então c_1 e c_2 serão chamados de conjugado característico, simbolizados por c e \hat{c} .

Definição do grau de compatibilidade: se $R_1(t) = (N_1(t), c, c(N_1(t)))$ e $R_2(t) = (N_2(t), \hat{c}, \hat{c}(N_2(t)))$, e os conjugados característicos c e \hat{c} formam um conjunto extenso X_0 , com um limite definido em $c(N_1(t))$, quando $\hat{c}(N_2(t)) \in X$, então chama-se de $[minK_{X_0}(x), maxK_{X_0}(x)] = [p_1, p_2], x \in X_1$, de intervalo de compatíveis graus de R_2 em R_1 . Logo:

- se $p_1 > 0$, R_2 é compatível com R_1 ;
- se $p_2 < 0$, R_2 é incompatível com R_1 ;
- se $0 \in [p_1, p_2]$, R_2 é simultaneamente compatível e incompatível com R_1 .

Para estas condições, pode-se dizer que: se R_2 for incompatível com R_1 , ou seja, o $maxK_{X_0}(x)$ é negativo, não haverá uma solução válida para resolver o problema de contradição usando a extensão do elemento matéria. Assim, a restrição de qualidade só é válida para $p_2 > 0$, em que o elemento matéria estendido é compatível com o elemento matéria original.

Após uma abordagem generalizada sobre os três tipos de restrições que podem ser aplicadas ao elemento matéria, conclui-se necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições:

- o grau de superioridade do objeto é positivo, $C(N_j) > 0$;
- o elemento matéria estendido só é verdadeiro para $K_{\tilde{V}_0}(v) \geq 0$;
- o elemento matéria estendido é compatível com o original, se $p_2 > 0$.

O entendimento das restrições para a construção do elemento matéria e dos conjuntos extensos é a base que compõe a teoria da extensão. A partir desse conhecimento fica fácil aplicar a teoria à necessidade desejada.