

TESE

1157

FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

MANUTENÇÃO PREDITIVA
INTELIGENTE DE TRANSFORMADORES
VIA ANÁLISE CROMATOGRAFICA

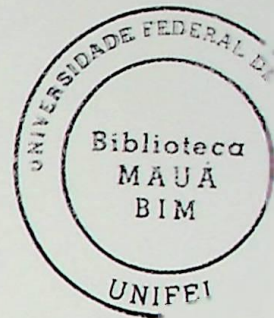
JAIME SUÑÉ

ITAJUBA - MG

2001



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



**MANUTENÇÃO PREDITIVA
INTELIGENTE DE
TRANSFORMADORES VIA
ANÁLISE CROMATOGRÁFICA**

Dissertação apresentada à Escola
Federal de Engenharia de Itajubá,
para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Jaime Suñé

Itajubá

2001

CLASS.	621.314 (043.2)
CUTTER.	S 952 m
TOMBO.	1157



MANTENÇÃO PERMANENTE DE
INTELECTO DE
TRABALHADORES VIA
ANÁLISE CROMATOGRAFICA

Jaime Suñé

**MANUTENÇÃO PREDITIVA
INTELIGENTE DE
TRANSFORMADORES VIA
ANÁLISE CROMATOGRÁFICA**

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Germano Lambert Torres

Co-orientador:
Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva

Itajubá

Dezembro/2001

Agradecimentos

À minha esposa e filho por entenderem a ausência prolongada.

Ao Prof. Dr. Germano Lambert Torres pela amizade e incentivo durante a orientação desta dissertação.

À Itaipu Binacional pela patrocínio do curso de mestrado.

Ao Eng. José Guilherme Rodrigues Filho pelo companheirismo.

Ao Prof. Alexandre Aoki pelo apoio dispensado.

À todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente.

À Deus.

SUMÁRIO

Agradecimentos	lii
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Gráficos.....	x
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Manutenção	2
1.2.1 Introdução	2
1.2.2 Conceitos	3
1.3 Transformador	6
1.3.1 Introdução	6
1.3.2 Definições	6
1.3.3 Constituição	8
1.3.4 Transformadores na Central Hidrelétrica da Itaipu Binacional	12
1.4 Organização do trabalho	13
2 Elementos Definidores da Qualidade Operacional do Transformador	14
2.1 Papel	14
2.1.1 Introdução	14
2.1.2 Composição do papel	14
2.1.3 Tipos de papel	15
2.1.4 Envelhecimento do papel.....	16
2.1.5 Critério de fim de vida segundo a análise do papel	17
2.1.6 Conclusão	22
2.2 Óleo Mineral Isolante	23
2.2.1 Introdução	23

2.2.2 Histórico	23
2.2.3 Características físico-químicas	24
2.2.4 Conclusão	25
2.3 Análise de Gases	26
2.3.1 Introdução	26
2.3.2 Histórico	27
2.3.3 Formação de gases	27
2.3.4 Coleta de óleo isolante	29
2.3.5 Ensaio Gás-cromatográfico	30
2.3.6 Interpretação dos resultados	31
2.3.7 Periodicidade	32
2.3.8 Importância como técnica de manutenção preditiva	33
2.3.9 Resultados práticos obtidos na Itaipu Binacional	34
3 Normas e Critérios Sugeridos para Diagnóstico	36
3.1 Introdução	36
3.2 Normas ou Métodos existentes	39
3.2.1 Método NBR 7274/1982	40
3.2.2 Critério de Rogers	42
3.2.3 Critério de Dörnemburg	43
3.2.4 Critério de Duval	43
3.2.5 Método de análise proposto pelo LABORELEC (Bélgica)	44
3.2.6 Critério de Pugh	46
3.2.7 Critério a partir dos Gases Chaves	47
3.3 Classificação segundo normas	51
3.3.1 Base de dados	51
3.3.2 Classificação dos resultados	52
3.3.2.1 Método NBR 7274/1982	53
3.3.2.2 Critério de Rogers	53
3.3.2.3 Critério de Dörnemburg	54
3.3.2.4 Critério de Duval	54
3.3.2.5 Método de análise proposto pelo LABORELEC (Bélgica)	55
3.3.2.6 Conclusão	56

3.4 Proposta de Solução	56
4 Elementos das Teorias Utilizadas	61
4.1 Introdução	61
4.2 Conjuntos Aproximados ("Rough Sets")	61
4.2.1 Introdução	61
4.2.2 Conceitos Básicos	63
4.2.3 Propriedades Operacionais dos Conjuntos Aproximados	69
4.2.4 Atributos dispensáveis e atributos indispensáveis	70
4.2.5 Conceito de conjunto redução e núcleo básico	71
4.2.6 Algoritmo Proposto	73
4.3 Sistemas Difusos	79
4.3.1 Introdução	79
4.3.2 Lógica Difusa	79
4.3.3 Controlador Difuso	82
4.3.4 Aplicação	83
5 Aplicando as técnicas de IA às Normas ou Critérios	91
5.1 Introdução	91
5.2 A metodologia proposta aplicada à NBR 7274	92
5.3 A metodologia proposta aplicada ao Critério de Rogers	94
5.4 Conclusão	100
6 Ferramenta Computacional e Testes	101
6.1 Introdução	101
6.2 Ferramenta Computacional	101
6.3 Testes	105
6.3.1 Teste 01	106
6.3.2 Teste 02	108
6.3.3 Teste 03.....	110
6.3.4 Teste 04.....	113
6.3.5 Teste 05.....	115
6.4 Conclusão.....	118
7 Conclusão	119
8. Referências Bibliográficas.....	123

RESUMO

Transformadores são equipamentos que durante sua operação normal sofrem esforços elétricos e mecânicos que podem causar aquecimento ou deformações da parte ativa. Quando a parte ativa destes transformadores é imersa em óleo isolante, o aquecimento causado pelos esforços elétricos altera a composição do óleo isolante causando a liberação de diversos gases, dependendo da temperatura atingida e o local da parte ativa aquecido. O ensaio de gás-cromatografia quantifica e determina os gases dissolvidos no óleo a partir de pequenas amostras. Interpretar os resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia leva ao conhecimento das condições de funcionamento de um transformador. Como apoio à interpretação deste resultados existem métodos de análise propostos em normas e critérios. Estes métodos fornecem tabelas de conhecimento que determinam a causa da falha incipiente no transformador a partir dos valores das concentrações dos gases obtidos no ensaio de gás-cromatografia. Dependendo da combinação de valores os métodos apresentam falhas nas tabelas de conhecimento, não apresentando diagnósticos possíveis.

Este trabalho propõe a expansão do conhecimento contido nos métodos de análise dos valores obtidos no ensaio de gás-cromatografia a fim de eliminar as falhas nas tabelas de conhecimento. São utilizadas técnicas de inteligência artificial, Teoria dos Conjuntos Aproximados e Sistemas Difusos, como ferramentas na adequação dos métodos de análise. Os novos diagnósticos propostos pelas tabelas de conhecimento já modificadas são refinados com a utilização de Sistemas Difusos.

Os resultados obtidos mostram a eficiência da metodologia utilizada com a eliminação de combinações de valores sem diagnóstico proposto e validam a metodologia nos testes realizados.

ABSTRACT

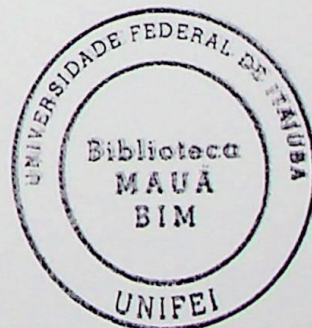
Transformers are equipment that during its normal operation suffers electric efforts, which that can cause heating or deformations of the active part. When the active part of modifies the composition of the isolation oil. The heating caused for the electric efforts the reached temperature and the place of the warm active part. The dissolved gas analysis essays quantify and determine the gases dissolved in the oil from small samples. To interpret the results gotten in the dissolved gas analysis essay leads to knowledge of the conditions of considered in norms and criteria exist. These methods supply knowledge tables that determine the cause of incipient feed in the transforming one from the values of the concentration of the gases gotten in the dissolved gas analysis essay. Depending on the combination of values the methods they present feeds in tables of knowledge, not presenting possible diagnostics.

This work considers the expansion of the knowledge contained in the methods of analysis of values gotten in the dissolved gas analysis essays in order to eliminate the feeds in knowledge tables. Techniques of Artificial Intelligence: Theory of Rough Sets, and Theory of Fuzzy Sets are used as tool in the adequacy of the analysis. These theories are applied in the reduction of the relations of input in tables, generating new tables of knowledge .

The obtained results show the efficiency of the methodology used with the elimination of superfluous combinations of values without considered diagnosis, and they validate the methodology in the carried through tests.

Lista de Figuras

Figura 2.1 : Fórmula estrutural da celulose.....	15
Figura 3.1 : Sistema de análise proposto.....	60
Figura 4.1: Região de aproximação inferior no universo U.....	65
Figura 4.2: Região de aproximação superior no universo U.....	65
Figura 4.3: Regiões de interesse para a Teoria dos Conjuntos Aproximados.....	66
Figura 4.4 : Região de aproximação superior.....	67
Figura 4.5 : Regiões de aproximação inferior.....	68
Figura 4.6 : Regiões Positiva, Negativa e de Fronteira.....	68
Figura 4.7 : Representação Fuzzy.....	81
Figura 6.1 : Tela principal do sistema.....	103
Figura 6.2 : Tela para cadastro de resultados.....	104
Figura 6.3 : Tela de diagnóstico.....	104
Figura 6.4 : Diagnóstico proposto para o teste 01.....	108
Figura 6.5 : Diagnóstico proposto para o teste 02.....	110
Figura 6.6 : Diagnóstico proposto para o teste 03.....	112
Figura 6.7 : Diagnóstico proposto para o teste 04.....	115
Figura 6.8 : Diagnóstico proposto para o teste 05.....	117



Lista de Gráficos

Gráfico 2.1 - FURFURAL vs. GP	20
Gráfico 2.2 : Monitoramento do Envelhecimento do Papel pela Concentração de Furfural no Óleo	21
Gráfico 3.1 : Arco no óleo	49
Gráfico 3.2 : Descargas Parciais	50
Gráfico 3.3 : Óleo Superaquecido.....	50
Gráfico 3.4 : Celulose Superaquecida.....	50
Gráfico 3.5 : Eletrólise.....	51
Gráfico 4.1: Grau de Pertinência de CO	85
Gráfico 4.2: Grau de Pertinência de H ₂	85
Gráfico 4.3: Grau de Pertinência de CH ₄	86
Gráfico 4.4: Grau de Pertinência de C ₂ H ₆	86
Gráfico 4.5: Grau de Pertinência de C ₂ H ₄	87
Gráfico 4.6: Grau de Pertinência de C ₂ H ₂	87

Lista de Tabelas

Tabéla 2.1 : Gás Medido e Sensibilidade do Gás	30
Tabela 2.2 : Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante.....	35
Tabela 3.1 : Concentração de gases dissolvidos.....	37
Tabela 3.2 : Relações propostas pela norma NBR 7274.....	37
Tabela 3.3 : Diagnóstico proposto conforme Relações Norma NBR 7273.....	38
Tabela 3.4 : Resultados obtidos para as relações propostas pela NBR 7274	38
Tabela 3.5 : Diagnóstico proposto para o exemplo, conforme NBR 7274.....	39
Tabela 3.6 : Relações propostas pela norma NBR 7274/1982.....	40
Tabela 3.7 : Diagnóstico proposto pela norma NBR 7274/1982.....	41
Tabela 3.8 : Relações propostas pelo critério de ROGERS.....	42
Tabela 3.9 : Diagnóstico proposto pelo critério de ROGERS.....	42
Tabela 3.10 : Relações e diagnóstico pelo critério de Dörnemburg.....	43
Tabela 3.11 : Relações e diagnóstico pelo critério de Duval.....	44
Tabela 3.12 : Classificação segundo o critério Laborelec.....	45
Tabela 3.13 : Recomendações segundo critério Laborelec.....	46
Tabela 3.14 : Campos da base de dados.....	52
Tabela 3.15 : Classificação do histórico utilizando a NBR 7274/1982.....	53
Tabela 3.16 : Classificação do histórico utilizando Rogers.....	53
Tabela 3.17 : Classificação do histórico utilizando Dörnemburg.....	54
Tabela 3.18 : Classificação do histórico utilizando Duval.....	54
Tabela 3.19 : Classificação do histórico utilizando LABORELEC.....	55
Tabela 4.1 : Conjunto de conhecimento inicial.....	74
Tabela 4.2 : Eliminação do atributo C_2H_2/C_2H_4	75
Tabela 4.3 : Eliminação do atributo CH_4/H_2	76
Tabela 4.4 : Eliminação do atributo C_2H_4/C_2H_6	76

Tabela 4.5 : Eliminado um elemento do conjunto de conhecimento inicial.....	77
Tabela 4.6 : Core do exemplo.....	77
Tabela 4.7 : Conjunto reduzido do exemplo.....	78
Tabela 4.8 : <i>NBR 7274</i> após <i>TCA</i> exemplo 06.....	83
Tabela 4.9 : Entrada de gases para Conjuntos Difusos.....	84
Tabela 4.10 : Representação de diagnósticos do critério de gás-chave.....	84
Tabela 4.11 : Representação dos gases do critério de gás-chave.....	88
Tabela 4.12 : Graus de pertinência para o exemplo.....	89
Tabela 4.13 : Resultados obtidos na análise cromatográfica.....	90
Tabela 5.1 : Variáveis possíveis conforme <i>NBR 7274</i>	92
Tabela 5.2 : Relações da <i>NBR 7274</i> após <i>TCA</i>	93
Tabela 5.3 : Variáveis possíveis conforme <i>NBR 7274</i> após <i>TCA</i>	93
Tabela 5.2 : Variáveis possíveis conforme <i>Rogers</i>	95
Tabela 5.5 : Relações de <i>Rogers</i> após <i>TCA</i>	96
Tabela 5.6 : Variáveis conforme <i>Rogers</i> após redução com <i>TCA</i>	97
Tabela 6.1 : Valores para teste 01	107
Tabela 6.2 : Valores para teste 02	109
Tabela 6.3 : Valores para teste 03	111
Tabela 6.4 : Valores para teste 04	114
Tabela 6.5 : Valores para teste 05	116

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Um ambiente competitivo, não mais estatal, como o vivido hoje pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, com regras rígidas quanto à qualidade de energia produzida, exige cada vez mais investimentos por parte das concessionárias de energia elétrica, tanto no aumento do sistema para atender o crescimento da demanda como na melhoria da condição operativa dos equipamentos existentes.

O processo de adequação dos equipamentos existentes a uma exigência maior por parte do sistema interligado leva à revisão dos processos hoje praticados na manutenção destes equipamentos.

Os desligamentos necessários para a realização de manutenções preventivas tornam-se cada vez mais difíceis, valorizando as técnicas de manutenção que não exijam a retirada do equipamento de serviço para intervenção.

As técnicas preditivas de manutenção, muitas vezes em conjunto com sistemas de monitoramento, passam a ter importância fundamental ao acompanhamento do desempenho dos equipamentos em serviço.

A análise dos resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia é um método eficiente para verificação das condições operativas de um transformador que tenha sua parte ativa imersa em óleo isolante.

A forma de tratar os resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia deve ser criteriosamente analisada e será tema deste trabalho.

1.2 Manutenção

1.2.1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica devido a sua importância está rigidamente ligada ao desenvolvimento social e econômico de um país. Com o desmembramento do setor elétrico estatal, e passando a responsabilidade de gerar e distribuir a energia elétrica para o setor privado, com o incentivo à livre concorrência, foram criadas normas rígidas quanto a qualidade do fornecimento desta energia.

O sistema elétrico interligado, composto por uma diversidade considerável de equipamentos elétricos, das mais diversas procedências, classes de tensão, potência e aplicações exige um sistema de manutenção e operação apropriados a sua complexidade e importância.

A disponibilidade (tempo em que os equipamentos estão aptos para serem operados) dos equipamentos e instalações é um fator importante quando consideramos qualidade de fornecimento de energia elétrica, e esta disponibilidade só é conseguida com métodos adequados de manutenção.

A manutenção de equipamentos contribui com a maior disponibilidade dos equipamentos ao sistema quando ela é executada de forma planejada e otimizada, intervindo somente no momento necessário, no menor tempo possível, visando reduzir os riscos de uma interrupção de energia ao sistema.

A manutenção também exerce papel importante na rentabilidade econômica de um sistema elétrico, uma vez que atividades de manutenção são desenvolvidas com a intenção de melhorar a performance e aumentar o tempo de vida útil dos equipamentos, postergando ao máximo investimentos necessários a reposição de equipamentos.

Luís Cordeiro de Barros Filho [1] afirma que apesar de as empresas estarem estabelecendo uma visão estratégica, na prática verifica-se que a necessidade de incrementar o aporte de conhecimento na área de engenharia de manutenção é essencial para obtenção de eficácia, estabelecimento de eficiência e efetividade nas ações de

manutenção, principalmente no que concerne a resultados de redução de custos, para conseqüente elevação da produtividade.

Investimentos vem sendo feitos na pesquisa de métodos de análise das condições operativas de equipamentos elétricos com o desenvolvimento de sensores e modelos de diagnósticos que não necessitem desligamentos dos equipamentos para ensaios (testes), também chamado de monitoramento on-line de equipamentos. Com a instalação destes sensores espera-se reduzir o número de desligamentos necessários à algumas manutenções, permitindo um melhor planejamento da atividade manutenção.

Em algumas empresas de produção de energia elétrica, como na Itaipu Binacional, existe uma sistemática de manutenção e operação que considera a grande variedade de equipamentos das mais diversas procedências e permite a capacitação dos técnicos na execução dos respectivos serviços de forma homogênea e padronizada. Através desta sistemática as atividades de operação e manutenção são definidas, analisadas, programadas e controladas, dentro de um processo de gerência capaz de evidenciar desvios, permitindo planejamento e a adoção de ações preventivas e/ou corretivas em tempo hábil.

1.2.2 CONCEITOS

A seguir são apresentados alguns dos conceitos utilizados em manutenção. Estes conceitos foram extraídos de [2].

Função Requerida é o conjunto de condições de funcionamento para o qual o equipamento foi projetado, fabricado ou instalado.

Operação é o conjunto de ações de supervisão e controle do funcionamento dos equipamentos e estruturas da instalação, visando: garantir a segurança operacional e pessoal, otimizar os recursos disponíveis e atender as necessidades dos clientes.

Falha é toda alteração física ou química no estado do equipamento que o impede de desempenhar a sua *função requerida* e o leva invariavelmente à indisponibilidade.

Defeito é toda alteração física ou química no estado de um equipamento que não o impede de desempenhar a sua função requerida, podendo o mesmo operar com restrições. Um defeito se não reparado levará o equipamento à falha. A correção de um defeito caracteriza a ação como manutenção corretiva.

Diagnóstico – Segundo Gil Branco Filho [3] o diagnóstico em manutenção é a identificação da causa provável de uma falha ou de um defeito, com a ajuda de dados levantados, experiência e raciocínio.

Manutenção é toda ação realizada em um equipamento, estrutura ou sistema que se esteja controlando, conservando ou restaurando, a fim de que o mesmo permaneça em funcionamento ou retorne a suas funções requeridas.

Manutenção Corretiva é caracterizada pela intervenção no equipamento após ser constatado o defeito ou falha, conforme o nome indica, procedendo ao reparo ou correção do defeito, normalmente realizada com o equipamento desligado.

A *manutenção corretiva* pode ser subdividida em dois tipos:

- *Manutenção Corretiva Paliativa* é quando a ação da manutenção retira o equipamento do estado de falha e coloca o equipamento provisoriamente em estado de operação, no entanto é necessária nova intervenção no equipamento para que este fique em situação de operação em forma definitiva. Exemplo: inibir contato de trip causado por determinado relé, sem no entanto eliminar a causa da falha, que causou o fechamento do contato de trip.
- *Manutenção Corretiva Curativa* é quando a ação da manutenção retira o equipamento do estado de falha e coloca o equipamento definitivamente em estado de operação, de acordo com sua função requerida. Exemplo: ao contrário da manutenção corretiva paliativa onde o contato de trip foi simplesmente inibido, neste tipo de manutenção a causa do trip seria pesquisada e a origem da falha eliminada definitivamente

Manutenção Preventiva é toda manutenção realizada em um equipamento com a intenção de reduzir a probabilidade de falha. É uma intervenção de manutenção prevista, preparada e programada antes da data provável do aparecimento da falha [2].

A *manutenção preventiva* pode ser subdividida em dois grupos:

- *Manutenção Preventiva Sistemática*, que é a manutenção preventiva realizada conforme um quadro de programação preestabelecido em função do tempo ou do número de unidades de uso (horas de funcionamento, número de manobras, etc.);
- *Manutenção Preventiva Não Sistemática*, que é a manutenção preventiva programada segundo o acompanhamento das características do estado de um equipamento, levando em consideração valores predeterminados.

Manutenção Preditiva é aquela manutenção onde as atividades são desenvolvidas com o equipamento no sistema, cumprindo com suas *funções requeridas*, com o objetivo de prever o momento da falha, fornecendo assim possibilidades de intervenção no momento ótimo. Esta intervenção seria caracterizada como uma *manutenção preventiva não sistemática*.

Manutenção de Emergência é a situação onde o equipamento deve sofrer a intervenção da manutenção imediatamente.

Manutenção de Urgência é a situação em que o equipamento deve sofrer a intervenção da manutenção no prazo máximo de 48h.

Manutenção programável caracteriza-se pela observação de um defeito que pode esperar pela programação rotineira da manutenção, isto significa que existe a possibilidade de ser aguardado o momento mais adequado para intervenção no equipamento.

Disponibilidade - é a percentagem de tempo que um equipamento ou sistema está apto a desempenhar a sua função requerida, ou então, é a probabilidade de, em um dado momento, o equipamento ou sistema estar no estado disponível.

Confiabilidade - é a probabilidade de um equipamento ser capaz de desempenhar a sua função requerida de forma satisfatória, por um período de tempo determinado.

Manutenibilidade - é a capacidade do equipamento em receber manutenção, ou seja, é a probabilidade do equipamento retornar a desempenhar a sua função requerida,

dentro de um intervalo de tempo, quando a manutenção é realizada de acordo com procedimentos prescritos.

1.3 Transformador

1.3.1 INTRODUÇÃO

A seguir são apresentadas algumas definições relativas a transformadores, assim como seus componentes, principais materiais utilizados em sua fabricação e tipos de transformadores encontrados na Itaipu Binacional, empresa onde se encontram instalados os transformadores que são objeto de pesquisa de campo para esta dissertação.

1.3.2 DEFINIÇÕES

As definições apresentadas a seguir são apresentadas na norma brasileira NBR5356/1981 [4] com o intuito de difundir alguns termos normalmente empregados quando o assunto é transformador.

Transformador. é um equipamento elétrico que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos, com a mesma frequência e, geralmente, com valores diferentes de tensão e corrente.

Autotransformador. são transformadores onde seus enrolamentos, primário e secundário tem certo número de espiras em comum.

Transformador regulador. são transformadores com mesma tensão nominal de entrada e saída, onde a tensão de entrada (primário) é fixa e a tensão de saída (secundário) é regulada de acordo com a carga aplicada em seus terminais através de um comutador de derivações sob carga;

Transformadores trifásicos são aqueles transformadores com 3 enrolamentos;

Transformadores monofásicos são aqueles transformadores com 1 enrolamento;

Banco de transformadores é um conjunto de transformadores monofásicos interligados, de modo a formar o equivalente a um transformador polifásico;

Terminal é a parte condutora de um transformador destinada à sua ligação com um circuito externo;

Terminal de linha é aquele destinado a ser ligado a uma fase do circuito externo;

Derivação é uma ligação feita em qualquer ponto do enrolamento, de modo a permitir a mudança das relações de tensões e de correntes através da mudança da relação de espiras;

Enrolamento é um conjunto de espiras que constituem um circuito elétrico de um transformador. Para um transformador polifásico o enrolamento é a combinação dos enrolamentos de fase;

Enrolamento de fase é o conjunto de espiras que constituem uma das n partes iguais de um enrolamento polifásico de n fases;

Enrolamento de alta tensão é aquele enrolamento cuja tensão é a mais elevada de todas;

Enrolamento de baixa tensão é aquele enrolamento cuja tensão é a menos elevada de todas;

Enrolamento de média tensão é qualquer um dos enrolamentos de um transformador de vários enrolamentos, cuja tensão nominal fica compreendida entre os dois enrolamentos de baixa e alta tensão;

Enrolamento primário é aquele que recebe energia;

Enrolamento secundário é aquele que fornece energia;

Ligação é a forma como os enrolamentos de fase estão conectados;

Ligação estrela: Ligação a um ponto comum de uma extremidade de cada um dos enrolamentos de fase de um transformador polifásico, ou de cada um dos enrolamentos de mesma tensão nominal de transformadores monofásicos associados em banco polifásico, sendo a outra extremidade ligada ao terminal de linha adequado; No caso de transformadores ou bancos trifásicos, essa ligação também pode ser denominada “ligação Y”;

Ligação Delta: Ligação em série de enrolamentos de fase de um transformador trifásico, ou dos enrolamentos de mesma tensão nominal de transformadores monofásicos associados em banco trifásico, de maneira a formarem um único circuito fechado;

Característica nominal é o conjunto de valores nominais atribuídos às grandezas que definem o funcionamento de um transformador, nas condições especificadas na respectiva norma, e que servem de bases às garantias do fabricante e aos ensaios.

Carga é o conjunto dos valores das grandezas elétricas que caracterizam as solicitações impostas em cada instante ao transformador pelo sistema elétrico a ele ligado.

1.3.3 CONSTITUIÇÃO

Um transformador é um equipamento elétrico constituído das seguintes principais partes: parte ativa, tanque principal, buchas, comutador de derivações, meio isolante e acessórios.

Os principais acessórios de um transformador são descritos abaixo.

Dispositivo de alívio de pressão: tem como função eliminar sobrepressões internas ao transformador causadas pela expansão súbita do líquido refrigerante/isolante protegendo assim o tanque do transformador quanto a possíveis deformações. Podem ser divididos em dois tipos básicos: Tipo membrana, no qual o alívio de pressão ocorrerá pelo rompimento da membrana, Tipo válvula, onde uma válvula com mola, provida de um sistema de amplificação instantânea da força de atuação fecha-se automaticamente após a operação, impedindo, assim, a entrada de qualquer agente externo no interior do transformador.

Radiadores ou trocadores de calor: responsáveis pela troca de calor entre o meio isolante e o meio externo ao transformador.

A refrigeração do transformador ocorre através da troca de calor entre o líquido isolante/refrigerante, normalmente óleo mineral isolante. A circulação do líquido refrigerante pelos trocadores de calor pode ser por convecção ou forçada através de bombas de óleo. A circulação de água pode ser do tipo forçada por bombas ou por diferença de cotas entre a entrada e saída do circuito de água do trocador de calor ou ainda ter ventilação forçada por conjunto de ventiladores. A estas variações aplica-se a seguinte terminologia: ONAN (óleo natural ar natural), OFAN (óleo forçado ar natural), OFAF (óleo forçado ar forçado);

Tanque de expansão: é um tanque localizado acima do transformador destinado a absorver as variações de volume de óleo isolante dentro do transformador causadas pela diferença de temperatura de operação do transformador. O óleo isolante varia seu volume em 1% a cada 10°C de variação de temperatura. O tanque de expansão também pode ter por função isolar o óleo isolante do meio ambiente, situação denominada de selagem, podendo apresentar as seguintes variações:

- *Transformador Selado* - São aqueles transformadores onde existe membrana ou bolsa de borracha instalada no conservador (tanque de expansão) evitando o contato direto do óleo isolante com o meio ambiente. Transformadores selados com colchão de gás são aqueles transformadores que não possuem tanque de expansão (conservador), ao invés disto possuem um colchão de gás (Nitrogênio) dentro do tanque principal do transformador.
- *Transformador não selado* - São os transformadores que não possuem sistema de selagem dentro do conservador (tanque de expansão) e quando ocorre a expansão do óleo isolante devido ao aquecimento do óleo ou a retração do óleo devido ao decréscimo de temperatura o ar é expelido ou admitido para o tanque de expansão através de respiro livre com a atmosfera, passando por um recipiente contendo sílica-gel ou através de um dispositivo que seca o ar por diferença de temperatura chamado drycool. Tanto em transformadores com sistema de selagem ou não é instalado um desumidificador de ar (Secador de ar) ou um pulmão adicional contendo Nitrogênio.

O *secador de ar* é composto de um recipiente metálico, no qual está contido o agente secador e uma câmara para óleo, colocada diante do recipiente (que contém o agente secador) isolando-o da atmosfera. Durante o funcionamento normal do transformador, o óleo aquece e dilata, expulsando o ar do conservador através do secador. Havendo diminuição da carga do transformador ou da temperatura ambiente, também haverá abaixamento da temperatura do óleo, acompanhada da respectiva redução do volume. Forma-se, então, uma depressão de ar no conservador e o ar ambiente é aspirado através da câmara e do agente secador, o qual absorve a umidade contida no ar, que entrará em contato com o óleo. Em transformadores com pulmão adicional de nitrogênio substitui-se o secador de ar pelo pulmão adicional.

O *agente secador* dentro do secador de ar é denominado sílica-gel, sendo vítreo e duro, quimicamente quase neutro e altamente higroscópico. Sua cor natural é azul, quando livre de água. É capaz de absorver água até 40% de seu próprio peso. Devido à absorção de água, torna-se róseo, devendo, então, ser substituído. Pode ser regenerado através de processo de secagem em estufa aquecida a temperatura entre 60 e 100 °C e reutilizado. Após a regeneração, a sílica-gel deve ser conservada num recipiente seco, hermeticamente fechado.

Relé de gás (tipo Bucholz): O relé de gás tipo Bucholz tem por finalidade proteger aparelhos elétricos que trabalham imersos em líquido isolante, geralmente transformadores. Falhas ocasionadas por sobrecargas ou isolação defeituosa dos enrolamentos ocorridas em transformadores podem aquecer o óleo isolante a ponto de gerar gases. O relé Bucholz é normalmente montado entre o tanque principal e o tanque de expansão do transformador. Internamente ao relé encontram-se duas bóias montadas uma sobre a outra. Quando do acúmulo de uma certa quantidade de gás no relé, a bóia superior é forçada a descer, se esta quantidade de gás aumentar ou houver uma produção excessiva de gás que provoque uma circulação de óleo no relé, a bóia inferior também descerá. Em ambos os casos, as bóias ao sofrerem o deslocamento, acionam um contato elétrico. O tratamento dado a este contato elétrico muda de acordo com a política de proteção de cada empresa.

Indicador de nível de óleo: Os indicadores magnéticos de nível têm por finalidade indicar com precisão o nível do líquido isolante e, ainda, quando providos de contatos para alarme ou desligamento, servirem como aparelhos de proteção do transformador. Normalmente estão instalados no tanque de expansão. O mostrador dos

indicadores magnéticos de nível possui três indicações: MIN, que corresponde ao nível mínimo, 25°C, que corresponde à temperatura ambiente assinalada, e MAX, que corresponde ao nível máximo.

Buchas: As buchas são destinadas a permitir a conexão de um circuito externo ao transformador, podendo ser capacitiva ou não, impregnadas com óleo isolante ou não, dependendo da aplicação e do projeto utilizado pelo fabricante;

Comutador de derivações é um dispositivo que permite alterar a relação de espiras de um transformador, pela modificação da ligação das derivações de um mesmo enrolamento, podendo operar sob-carga (com o transformador energizado) ou não.

Termômetros: O sensor de temperatura está localizado no topo do transformador (fixado na tampa) e é destinado a medir a temperatura do óleo isolante e enrolamentos. O termômetro, possui contatos que servem para alarmar temperatura excessiva, desligar o transformador, ligar e desligar o sistema de refrigeração forçada. A temperatura no enrolamento é medida através de imagem térmica que reproduz indiretamente a temperatura do enrolamento. A temperatura do enrolamento, que é a parte mais quente do transformador, nada mais é do que a temperatura do óleo acrescida da sobre-elevação da temperatura do enrolamento (t) em relação ao óleo, causada pelo aquecimento de uma resistência que é alimentada por um transformador de corrente associado ao enrolamento secundário do transformador principal.

No sistema de isolamento de transformadores, o óleo mineral isolante em associação ao papel isolante é o conjunto utilizado em 95% da quantidade total de equipamentos fabricados. O envelhecimento de transformadores está diretamente relacionado à degradação de seu sistema isolante elétrico, constituído principalmente por papel/óleo, tendo a degradação do papel a maior influência na determinação do fim-de-vida de um transformador.

1.3.4 TRANSFORMADORES NA CENTRAL HIDRELÉTRICA DA ITAIPU BINACIONAL

Neste item são mencionados os equipamentos, transformadores, que compõe o parque de geração da Itaipu Binacional, equipamentos que são objeto desta dissertação.

Na Itaipu Binacional existem 90 transformadores divididos conforme tipo e aplicação da seguinte forma: 58 transformadores elevadores 18/525kV monofásicos, 4 transformadores 6.8/13.8kV trifásicos, 4 transformadores reguladores 13.8/13.8kV trifásicos, 8 transformadores abaixadores 525/13.8kV trifásicos, 2 transformadores 69/13.8kV trifásicos com regulação de tensão, 2 transformadores de aterramento, 3 autotransformadores 525/245kV trifásicos, 3 Transformadores reguladores 245/245kV trifásicos, 2 transformadores 13.8/0,480kV trifásicos e 2 transformadores 23/69kV trifásicos. Existem instalados nestes transformadores cerca de 3200m³ de óleo isolante.

Os transformadores principais dos geradores são unidades monofásicas, 18-525/ $\sqrt{3}$ kV, ligadas em bancos trifásicos. Cada banco trifásico tem seu quadro de controle local. Os transformadores monofásicos de 50 Hz têm potência de 275 MVA e os de 60 Hz 256 MVA. Cada setor de frequência possui duas unidades monofásicas de reserva com um painel de controle para acionamento periódico de componentes do sistema de resfriamento. A função básica do banco de transformadores principais dos geradores é elevar a tensão dos geradores de 18 kV para 525/ $\sqrt{3}$ kV. Nesta tensão são ligados à Subestação Isolada a Gás SF₆, possibilitando o transporte da energia gerada, à longa distância, através do sistema de Linhas de Transmissão de Extra Alta Tensão.

Para cada unidade geradora está instalado um banco de transformadores monofásicos, perfazendo, com as unidades de reserva, um total de 58 transformadores monofásicos, sendo:

- 29 Transformadores monofásicos, 50 Hz, 275 MVA, que formam 9 bancos trifásicos com duas unidades de reserva (TU-01 a TU-09);
- 29 transformadores monofásicos, 60 Hz, 256 MVA, que formam 9 bancos trifásicos com duas unidades de reserva (TU-10 a TU-18).

Os transformadores são do tipo, imersos em óleo, com resfriamento por circulação forçada de óleo e circulação forçada de água (ODWF). Cada unidade monofásica

é instalada em compartimento ventilado, equipado com sistema automático de proteção contra incêndio e separado das demais unidades e do restante da Casa de Força por meio de paredes corta-fogo. No piso, sob cada tanque, existe um poço com brita para recolher óleo derramado, água de proteção contra incêndio e para escoá-los através de um sistema de drenagem.

Cada unidade monofásica é ligada, no lado de tensão inferior (18 kV), aos barramentos blindados de fases isoladas provenientes da unidade geradora e, no lado de tensão superior (525 kV), à Subestação Isolada a Gás SF6. Cada banco trifásico tem um quadro de controle KT instalado em frente ao transformador monofásico da fase T (50 Hz) ou C (60 Hz).

1.4 Organização do trabalho

O trabalho está organizado conforme segue:

O Capítulo 2 apresenta os elementos definidores da qualidade operativa do transformador, tais como papel, óleo e análise de gases.

O capítulo 3 descreve as normas e critérios sugeridos para diagnóstico quanto a condição operativa do transformador.

O capítulo 4 apresenta a teoria básica sobre as técnicas de inteligência artificial utilizadas nesta dissertação.

O Capítulo 5 demonstra as aplicações feitas com as técnicas de inteligência artificial propostas às tabelas de conhecimento propostas pelos métodos de análise.

O capítulo 6 descreve a ferramenta computacional criada para testes e os resultados dos teste aplicados a cinco casos conhecidos.

O capítulo 7 são apresentadas as conclusões e propostas de novos trabalhos a serem desenvolvidos.

O Capítulo 8 apresenta as referências bibliográficas.

Elementos Definidores da Qualidade Operativa do Transformador

2.1 Papel

2.1.1 INTRODUÇÃO

Neste item é abordada a composição básica do papel utilizado em transformadores, os tipos de papeis existentes para esse fim e a característica do papel utilizado nos transformadores objeto deste trabalho. São feitos comentários sobre envelhecimento do papel, catalisadores deste envelhecimento, a importância do estabelecimento de um critério para análise de final-de-vida do papel e a correlação entre o final-de-vida do transformador com o fim de vida do papel isolante.

O papel está presente no transformador como parte da isolação sólida, principalmente no enrolamento, revestimento das conexões e barreiras.

2.1.2 COMPOSIÇÃO DO PAPEL

O papel é formado por longas fibras tendo a celulose como principal. Representa-se a molécula de celulose por uma cadeia de anéis de glucose, Figura 2.1. A celulose trata-se de um composto orgânico polimérico formado por uma cadeia de 950 a 1300 unidades de glucose. O *grau de polimerização molecular*, GP, é o número médio de anéis de glucose na molécula de celulose. O GP é obtido pela medida da viscosidade de uma solução de papel em um solvente apropriado (cuproetilenodiamina).

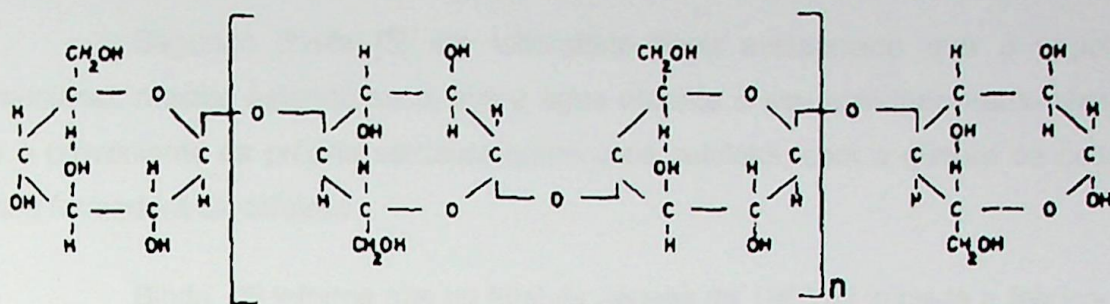


Figura 2.1 – Fórmula estrutural da celulose

2.1.3 TIPOS DE PAPEL

Binda [5] descreve que o papel utilizado em equipamentos elétricos é obtido a partir da polpa de madeira tratada pelo processo sulfato. Este processo foi desenvolvido por Carl F. Dahl, na Alemanha em 1884, sendo chamado "Kraft" por ser um papel mais forte que o papel obtido a partir da polpa de madeira tratada com soda cáustica, que era o método utilizado até então.

O papel Kraft tem como principais características a alta resistência mecânica e durabilidade, sendo estas características dependentes de fatores como: resistência e comprimento das fibras, capacidade de ligamento entre fibras e na distribuição das fibras na estrutura.

Segundo Binda [5], até 1960 o papel *Kraft convencional* era o único papel fabricado e especificado para uso em equipamentos elétricos imersos em óleo mineral isolante, projetados para elevação média de temperatura de 55°C máximo.

Segundo a NBR 5416 [10], entende-se como elevação média de temperatura a elevação média de temperatura dos enrolamentos, acima do ambiente, não superior a 55°C e elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima do ambiente, não superior a 65°C, referidos como transformadores de 55°C, e a transformadores com elevação média de temperatura dos enrolamentos, acima do ambiente, não superior a 65°C

e elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima do ambiente, não superior a 80°C, referidos como transformadores de 65°C.

Segundo Binda [5] em laboratório ficou evidenciado que o papel *Kraft convencional*, mesmo estando seco, libera água durante o seu envelhecimento térmico. A água é proveniente da própria estrutura química da celulose, com a quebra da cadeia de glucose formadora da celulose.

Binda [5] informa que no final da década de 1950 foi iniciada a fabricação do papel *Kraft termoestabilizado* cuja utilização mudou as normas de projeto de transformadores, com a determinação de um novo limite para a elevação média de temperatura do enrolamento, acima do ambiente, não superior a 65°C.

O novo papel apresentou maior estabilidade térmica, com menor formação de água, permitindo um carregamento maior destes equipamentos, obtendo-se assim um necessário redimensionamento nos projetos dos transformadores e uma expectativa de tempo maior para ser atingido o final-de-vida do transformador, quando o papel atinja níveis críticos de resistência a tração.

2.1.4 ENVELHECIMENTO DO PAPEL

O processo de envelhecimento de um transformador está diretamente relacionado com a resistência mecânica do papel isolante de sua isolação sólida, sendo o papel o componente da isolação sólida aquele que tem a capacidade de se deteriorar, ou perder suas qualidades mecânicas, com o passar do tempo sem no entanto perder suas características dielétricas.

Os fatores que mais influenciam na perda de qualidade, degradação, do papel, são: umidade (água), temperatura e agentes oxidantes, fatores estes que se apresentam normalmente durante a operação dos transformadores e que causam o aparecimento de glucose livre devido ao seccionamento da cadeia da celulose na ligação glicosídica.

O papel utilizado em transformadores imersos em óleo isolante podem apresentar degradação térmica, hidrolítica e oxidativa [6].

Na *degradação térmica*, além da glucose livre são formados: água, óxidos de carbono (CO e CO₂) e ácidos orgânicos.

Na *degradação hidrolítica*, catalisada pela presença de um ácido ou pela acidez do meio, ocorre a quebra das ligações glicosídicas da cadeia de celulose, formando glucose livre. A água em presença dos compostos ácidos formados pela oxidação dos hidrocarbonetos do óleo mineral isolante, participará da degradação do papel isolante.

Na *degradação oxidativa* são formados ácidos, aldeídos e água. Quando a oxidação envolve os Carbonos 2 e 3, abre-se a estrutura do anel de glucose, formando CO, CO₂ e H₂. As modificações enfraquecem as ligações glicosídicas, contribuindo para a cisão da cadeia da celulose, com a formação de glucose livre.

Outros produtos formados na degradação da celulose são os furanos, compostos que apresentam uma estrutura de anel com cinco lados. Os furanos, ao contrário da glucose, são solúveis no óleo mineral e portanto detectáveis neste líquido dielétrico.

Sintetizando: A *degradação térmica, hidrolítica e oxidativa* do papel, resulta em:

- Quebra da cadeia da celulose, e conseqüente decréscimo do grau de polimerização médio (GP) do papel;
- formação de compostos derivados do furano, solúveis no óleo isolante;
- formação dos gases CO e CO₂, solúveis no óleo mineral isolante.

2.1.5 CRITÉRIO DE FIM DE VIDA SEGUNDO A ANÁLISE DO PAPEL

Durante a operação do transformador, à medida que o papel vai envelhecendo, há um decréscimo de suas propriedades mecânicas, relacionado a uma diminuição do Grau de Polimerização (GP) do papel. O fim-de-vida do papel como isolante é considerado quando retém de 40 a 50% dos valores originais de suas propriedades mecânicas, o que corresponde à uma faixa de valores de GP de 100 à 250.

A dificuldade de determinação do final-de-vida de um isolamento sólido, papel, para equipamentos em operação a partir da determinação do GP está na

necessidade de interromper a operação do equipamento, drenar o óleo mineral isolante, colher amostras do local de maior temperatura do enrolamento celulósico, e reparar esse ponto.

Assim como o Grau de Polimerização, os compostos de furano também são gerados durante o processo de envelhecimento do papel isolante (exclusivamente pela degradação da celulose, pela glicose livre), sendo solúveis no óleo mineral isolante, mesmo o transformador estando operando dentro de seus parâmetros nominais.

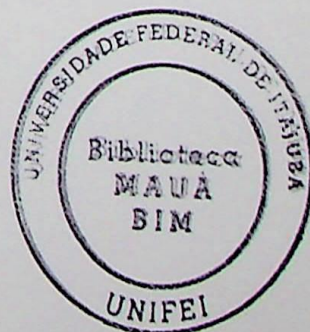
Entre os métodos existentes para determinação do teor de furanos no óleo mineral isolante estão: a cromatografia líquida de alta resolução (HPLC) e ultravioleta visível. Na Itaipu Binacional é adotado o método de medição por ultravioleta visível, por razões econômicas visto que é um processo com custo reduzido.

Burton et all [7] escreve sobre a taxa de formação de 2-furfuraldeído para o papel novo e o degradado: a medida que o papel se degrada ocorre a sua depolimerização, aumentando varias vezes a sua reatividade, que é a capacidade de produzir compostos derivados do furano. Assim a 97°C o papel novo produziria 2-furfuraldeído a uma taxa de 1.7×10^{-6} mg/g de papel/hora. Durante o tempo de vida de um transformador, uma taxa média três vezes maior seria típica, levando-se em consideração o aumento da taxa de produção com o envelhecimento do papel. Assim sendo, para um transformador contendo 40000 litros de óleo, em operação por 100000 horas (11 a 12 anos) seriam produzidos 0.5 mg de 2-furfuraldeído por grama de papel aquecido.

Dos compostos de furano o 2-furfuraldeído é o que mais foi estudado por ser o composto que melhor representa a condição de fim-de-vida da isolação celulósica, papel.

Xue Chendong [8] mediu o teor de 2-furfuraldeído em um grande número de transformadores, utilizando a cromatografia líquida de alta resolução, onde afirmou que: *"Baseado em uma análise estatística, a relação entre teores de furfural no óleo e o envelhecimento do papel é estudado, e um critério é sugerido para estimar o envelhecimento do papel em transformadores de potência"*.

De seu estudo, Xue Chendong propõe que: *"A equação de correlação entre GP e 2-furfuraldeído seja:"*



$$\log(\text{Fur})=1.51-0.0035D$$

Fur => teor de Furfuraldeído

D => grau de polimerização (GP) do papel isolante

No final de 1994, o Sub-Comitê de Manutenção (SCM) do Grupo de Coordenação de Operação Interligada (GCOI) criou, no âmbito do GTMS e CFQ, uma comissão destinada a estudar a correlação entre o Grau de Polimerização do Papel (GP) e o teor de 2-furfuraldeído (2fal) dissolvido no óleo isolante de transformadores, composta por diversas empresas do setor elétrico, entre elas a Itaipu Binacional, coordenada pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica). Em seu trabalho final, essa comissão também adotou a equação proposta por Xue Chendong, apesar de seus trabalhos partirem da suposição de que o transformador apresenta temperatura homogênea em todo seu enrolamento.

Através da equação de Xue Chendong [8] obtém-se o Gráfico 2.1, que indica a relação entre GP e 2-furfuraldeído.

Xue Chendong [8] apresentou no 7th International Symposium on High Voltage Engineering _ ISH, o Gráfico 2.2, que relaciona o teor de 2-furfuraldeído com o tempo de operação do equipamento.

Tenório [9] afirma que o acompanhamento da evolução do envelhecimento da isolação celulósica de transformadores de potência através do método de medição do teor de 2-furfuraldeído, não é afetado pelo processo de recondicionamento do óleo mineral isolante através de tratamento termo-vácuo.

No mesmo artigo Tenório [9] afirma que “Um exemplo que dificulta uma análise do envelhecimento através do 2-FAL é a substituição completa do óleo isolante, que desfigura o valor de 2-FAL, tendo-o a quase zero, o que impossibilita neste caso a se correlacionar com o GP, para se obter o real envelhecimento da unidade transformadora”.

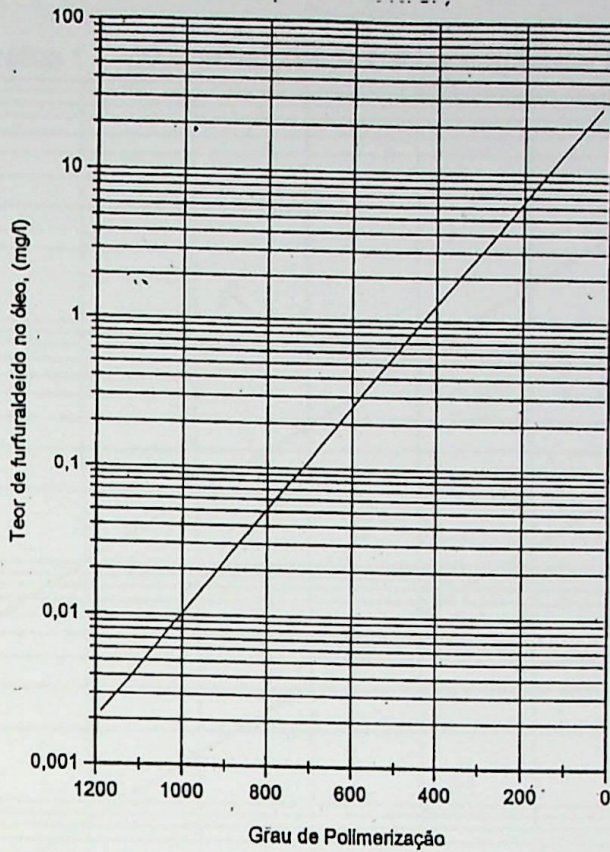
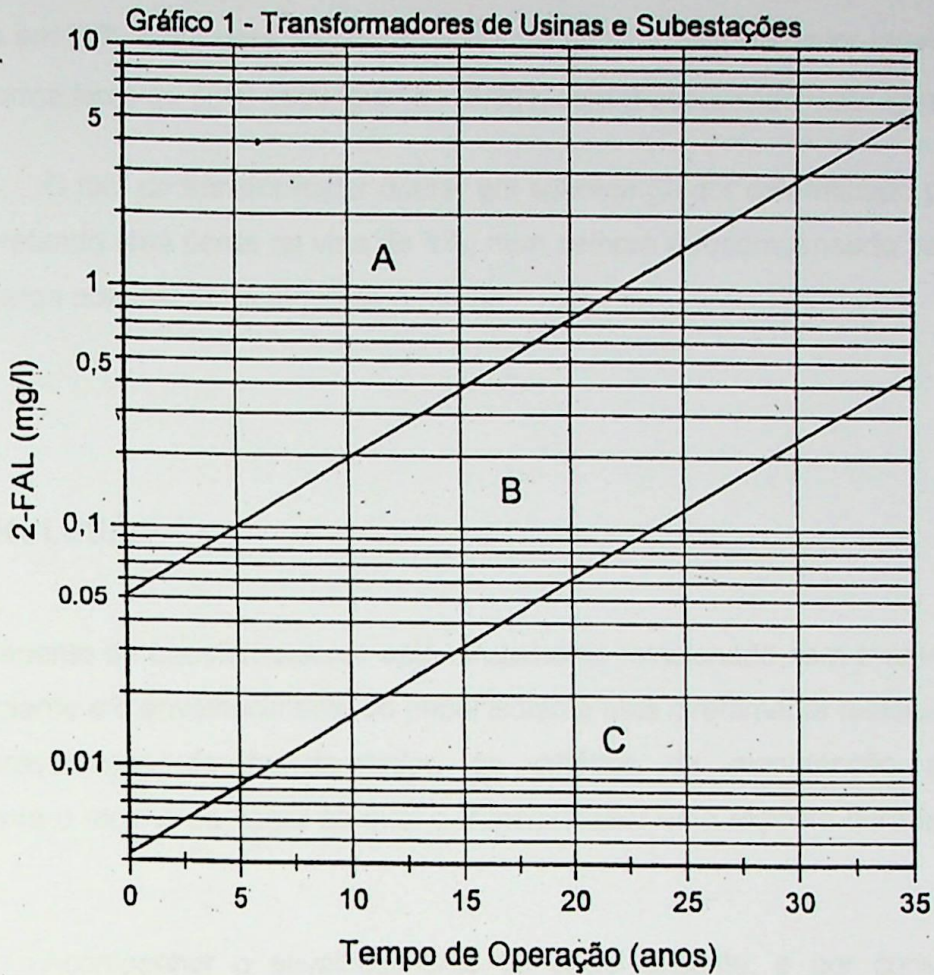


Gráfico 2.1 - FURFURAL vs. GP

O fim de vida de um transformador de potência está diretamente relacionado com a forma como foi operado durante sua vida útil. A norma NRB 5416 [10] fornece os procedimentos para aplicação de cargas em transformadores e autotransformadores de potência, imersos em líquido isolante.

Mantendo-se sob controle ações da água, ácidos e oxigênio, que são considerados contaminantes, conforme comentado anteriormente, o envelhecimento da celulose passa a ser predominantemente térmico e cumulativo. Portanto a NBR 5416 [10] considera que o envelhecimento está baseado na vida esperada do transformador sob efeito da temperatura de operação da isolação ao longo do tempo.



- A - zona de envelhecimento anormal
 B - zona de envelhecimento normal
 C - zona de envelhecimento lento

Gráfico2.2 : Monitoramento do Envelhecimento do Papel pela Concentração de Furfural no Óleo

A teoria de Arrhenius [10] fundamenta a deterioração da isolação em função do tempo e da temperatura, e estabelece que o logaritmo da vida da isolação é uma função do inverso da temperatura absoluta:

$$\log vida(horas) = A + (B / T)$$

T = temperatura absoluta em kelvin ($\theta_e + 273^\circ C$);

θ_e = temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos em graus celsius;

A e B são constantes da curva de expectativa de vida. Os valores para A e B são obtidos em [10], onde para transformadores de 55°C A assume valor igual a -14,133 e para transformadores de 65°C valor igual a -13,391, com B assumindo valor igual a 6972,15.

O fato do transformador operar em sobrecarga por determinado período de X horas, acarretando uma perda de vida de Y%, nem sempre é recompensado pela operação abaixo da carga nominal pelas mesmas X horas.

2.1.6 CONCLUSÃO

O envelhecimento de transformadores está diretamente relacionado com o envelhecimento do papel isolante e o envelhecimento do papel isolante esta diretamente relacionado com: o tipo de preservação do transformador, os critérios de manutenção adotados e principalmente o regime de carga ao qual o transformador está exposto durante sua "vida" operativa.

Acompanhar o envelhecimento do papel isolante, e por conseqüência o envelhecimento do transformador, é uma necessidade técnica e econômica, pois além de servir como indicativo de uma deterioração excessiva ou anormal da isolação sólida, que em conjunto com a análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo isolante pode nos levar a um diagnóstico do que pode estar acontecendo, também nos fornece indicativos para uma análise estratégica de investimentos econômicos futuros, tanto para reparos como para a simples reposição dos equipamentos.

Não há um critério único para avaliação do fim de vida de uma isolação sólida, papel, entretanto, com medições periódicas do teor de 2-furfuraldeído é possível fazermos uma avaliação da velocidade do envelhecimento adicional a que está sendo submetido o equipamento, comparando a perda de vida com a taxa de perda de vida média de referência, considerando a perda de vida média, a média da família a qual o transformador pertence [10].

2.2 Óleo Mineral Isolante

2.2.1 INTRODUÇÃO

O óleo isolante é produzido a partir de óleos crus de base naftênica ou parafínica, e quando utilizado em transformadores executa dupla função:

- como fluido responsável pela refrigeração do equipamento, diminuindo assim as perdas elétricas do equipamento e contribuindo com o prolongamento da vida útil do transformador ao fazer com que esse opere em temperaturas menores.
- como líquido isolante elétrico (dielétrico);

Controlar as condições físico-químicas do óleo isolante bem como os subprodutos existentes em sua composição, gases e furanos, durante a vida de um transformador de potência, é uma boa técnica de acompanhamento das condições operativas deste transformador.

2.2.2 HISTÓRICO

O óleo mineral isolante começou a ser utilizado como um óleo isolante de uso geral a partir de 1900, aproximadamente, sendo na época um óleo de base parafínica. A partir de 1925, com o aumento de potência e tensão dos transformadores começaram a ser exigidas maiores distâncias dielétricas entre as partes vivas, com o conseqüente aumento dimensional do transformador, sendo necessárias instalações desabrigadas, onde as temperaturas podem atingir valores inferiores a -10°C , sendo este o limite de fluidez do óleo parafínico produzido na época. Principalmente por apresentar ponto de fluidez de -40°C , o óleo mineral isolante de base naftênica passou a ser empregado em larga escala como líquido dielétrico em transformadores .

Em 1973 a Petrobras começou pesquisa no desenvolvimento de óleo parafínico no Brasil a partir de óleo cru árabe leve, iniciando a produção em escala industrial a partir de 1979, recebendo o nome comercial Lubrax AV-10, inicialmente liberado para transformadores de classe de tensão igual ou inferior à 34,5kV. Em 1988, através da Resolução Nº 09/88 de 01/Novembro/1988 foi liberado pelo Conselho Nacional de Petróleo o uso em equipamento de até 145kV.

O óleo existente nos transformadores que são objeto de pesquisa deste trabalho, são de base naftênica, Lubrax AV-58, fornecimento Petrobrás.

2.2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Apesar de não existir uma correlação entre as características físico-químicas do óleo isolante e o teor dos gases nele dissolvidos, neste item são abordadas características importantes que o óleo isolante deve ter para garantir o bom funcionamento do transformador.

O óleo isolante, assim como outros materiais utilizados como isolantes em um transformador, sofre um processo de envelhecimento normal durante sua operação, para o óleo isolante esta degradação está relacionada principalmente as condições de uso, tendo como catalisador deste processo a elevação de temperatura e presença de água no óleo.

A boa condição operativa, ou não, de um óleo isolante é verificada segundo algumas características físico químicas, sendo estas características medidas e analisadas segundo normas. Alguns dos principais ensaios realizados para verificação do estado do óleo isolante são os seguintes:

- Rigidez Dielétrica - a rigidez dielétrica mede a capacidade de um óleo isolante em suportar tensões elétricas nas freqüências de trabalho do transformador, sem apresentar falhas;
- *Água* - a água está presente no óleo isolante contido em transformadores, podendo ser oriunda do ambiente externo ao transformador, principalmente naqueles transformadores que não são

selados, e da degradação da isolação celulósica provocada pelo aquecimento excessivo. A presença de água no óleo isolante reduz o valor de rigidez dielétrica;

- *Cor* - a mudança de uma cor mais clara para uma cor mais escura indica a deterioração do óleo isolante;
- *Acidez* - a acidez é uma indicação de contaminantes no óleo isolante, sendo praticamente nula quando o óleo é novo e aumentando com a oxidação do óleo. A acidez é um dos indicativos de necessidade de regeneração do óleo isolante;
- *Tensão interfacial* - na superfície de separação entre o óleo isolante e a água se forma uma força de atração entre as moléculas dos dois líquidos, e esta força de atração é chamada de tensão interfacial. É uma característica muito sensível à presença de contaminantes como tintas, vernizes e produtos da oxidação do óleo.

2.2.4 CONCLUSÃO

O óleo mineral isolante, independente de sua origem, quer naftênica ou parafínica, utilizado como meio refrigerante e dielétrico em transformadores de potência, sofre envelhecimento de acordo com a característica operativa do transformador, carregamento. Se o transformador operar dentro de seus limites nominais o óleo isolante pode degenerar devido a presença de água ou partículas em suspensão; Quando o transformador é carregado acima das condições nominais ou ocorrendo uma solicitação do sistema que venha a causar o incremento da temperatura, o óleo isolante sofre degeneração físico-química e dependendo da temperatura atingida pode gerar gases combustíveis ou não. O tratamento dos valores de concentração destes gases é o objeto de estudo desta dissertação.

2.3 Análise de Gases

2.3.1 INTRODUÇÃO

Neste item é demonstrada a importância da análise dos gases dissolvidos no óleo isolante contido em equipamentos que utilizam óleo mineral como isolante elétrico, partindo do histórico deste ensaio, comenta o processo de formação de gases, procedimento de coleta e ensaio do óleo coletado, como interpretar os resultados obtidos, a periodicidade com que são realizados os ensaios, a importância deste ensaios como técnica preventiva e os resultados práticos obtidos na Central Hidrelétrica de Itaipu.

A cromatografia é uma técnica de análise de gás, capaz de processar pequenas amostras com grande sensibilidade e precisão, constituindo-se em um instrumento poderoso para identificação precoce de uma falha.

Isto representa dizer que a análise cromatográfica permite determinar a condição de operação do transformador.

Existem duas formas de execução deste ensaio, a primeira e mais usual, trata-se da análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante de maneira off-line, onde o óleo é extraído do transformador e analisado em laboratório, a segunda é on-line, com sensor de gases conectado a válvula de dreno do transformador, estando o sensor conectado a um sistema de monitoramento remoto.

Cromatografia on-line: são instalados equipamentos nos transformadores de potência de forma fixa, sensores, que fazem medições periódicas de 4 gases, chamados gases chaves: Hidrogênio (100% da concentração), Monóxido de carbono (18% da concentração), Etileno (1,5% da concentração), Acetileno (8% da concentração). Os sensores enviam os valores obtidos via par telefônico ou fibra ótica para uma CPU, chamada de remota, que tem a capacidade de armazenar os dados obtidos, formando assim o histórico de cada equipamento.

Esse método, por não medir todos os gases, serve como indicativo de anormalidade, ou tendência, devendo ser complementado com a cromatografia off-line.

2.3.2 HISTÓRICO

Na década de 60, a análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo mineral isolante começou a ser utilizada para monitorar o desempenho de equipamentos elétricos, como um ensaio da manutenção preventiva em transformadores de força, sendo posteriormente expandida para: reatores, reguladores, transformadores de corrente, transformadores de potencial e buchas de alta tensão.

A análise de gases dissolvidos em óleo isolante contido em transformadores começou a ser utilizada como técnica preventiva de manutenção na Itaipu Binacional desde o momento de aceitação das primeiras unidades fornecidas, 1982.

2.3.3 FORMAÇÃO DE GASES

Os Transformadores que utilizam o óleo mineral isolante como líquido isolante e refrigerante possuem em sua constituição um conjunto de materiais, dentre os quais os dielétricos que em sua maioria são compostos orgânicos.

Segundo Binda [11] o óleo mineral isolante e a celulose presente na isolação sólida de transformadores, quando expostos a temperaturas normais de operação liberam gases como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e compostos gasosos de hidrocarbonetos, devido a oxidação da celulose.

Quando o óleo isolante e a isolação sólida são submetidos a temperaturas acima da tida como normal de operação, situação oriunda da operação do transformador acima das condições nominais de projeto (aquelas para o qual o transformador foi projetado e construído), campos elétricos e magnéticos podem vir a produzir defeito ou falhas térmicas, elétricas ou mecânicas e sua decomposição forma gases combustíveis ou não.

Os gases formados são total ou parcialmente dissolvidos no óleo, diluídos e transportados através da convecção natural de funcionamento do transformador, ou através da circulação forçada do óleo isolante.

Dependendo do nível de aquecimento ao qual a isolação é submetida e o tipo de material envolvido, ou submetido a este aquecimento, ocorre o incremento de determinado gás dissolvido no óleo isolante.

Segundo a NBR 7274/Abril 1982 [12] a velocidade de produção de gases é ligada a taxa de liberação de energia pelo defeito. Defeitos de baixa taxa (descargas parciais, pontos quentes de baixa temperatura) produzem gases lentamente e esses provavelmente se dissolverão no óleo. Taxas mais altas (altas temperaturas no núcleo, por exemplo) produzirão gases mais rapidamente e parte deles provavelmente não é dissolvida no óleo isolante sendo coletada no relé de gás, com composição aproximada da de equilíbrio com gases dissolvidos.

A seguir são mostrados algumas situações onde ocorrem a formação destes gases dependendo do material envolvido no aquecimento e a temperatura alcançada:

Com o envolvimento do isolamento sólido celulósico haverá o aumento de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂).

O desenvolvimento de arco elétrico no óleo decompõe por pirólise o líquido dielétrico em seus componentes químicos básicos, formando carbono coloidal que se dispersa em suspensão no óleo, e liberando como gases típicos o hidrogênio (H₂) e acetileno (C₂H₂).

Descargas elétricas de baixa densidade de energia contribuem para o processo de ionização que libera radicais das moléculas dos compostos químicos do óleo, e os gases predominantes formados são hidrogênio (H₂) e o metano (CH₄).

A análise destes gases permite identificar a ocorrência de defeitos e/ou falhas evolutivas associadas aos materiais dielétricos utilizados na construção dos transformadores.

2.3.4 COLETA DE ÓLEO ISOLANTE

A coleta de óleo isolante consiste na obtenção de uma amostra representativa do óleo contido no equipamento em estudo, tendo-se sobretudo cuidado em evitar contaminação ou contato com o ar.

Em situações normais de manutenção preventiva, a amostra é retirada na válvula inferior de amostragem, sendo efetuada a amostragem em outros pontos quando em situação especial, como: registro do relé bucholz (relé de gás) e registro superior.

Entende-se por situação especial, quando o equipamento está sendo investigado quanto a possíveis danos decorridos de falhas no sistema elétrico, após ocorrência da operação da proteção do transformador, como confirmação de resultados duvidosos ou anormais, para acompanhamento mais criterioso de unidades em garantia, ou que se encontrem em situação de operação sob risco, etc...

Alguns transformadores tem como bucha de alta tensão uma bucha tipo papel/óleo impregnada com óleo isolante, onde em situações especiais também é retirada uma amostra de óleo isolante do registro central destas buchas.

Segundo a NBR 7070 [13] que regulamenta e orienta a maneira correta de se obter a amostra de óleo isolante de um equipamento, vários tipos de recipientes podem ser utilizados para retirada do óleo isolante da válvula de extração (válvula inferior), conforme descritos em [13], porém o mais utilizado pelas empresas concessionárias de energia é a seringa de 50 ml com torneira de 03 vias perfeitamente adaptada na extremidade da seringa. Estas seringas limpas e secas, devem ser acondicionadas em uma embalagem protetora para transporte, juntamente com etiqueta de identificação detalhada da amostra e dados sobre o equipamento de origem.

Após a realização da coleta, as amostras devem ser enviadas o mais rápido possível ao Laboratório. O tempo limite entre a extração da amostra até a sua análise final é de duas semanas. Apesar da seringa apresentar uma boa vedação, garantindo perdas menores que 2,5% de Hidrogênio (H_2) por semana, pois este é o gás menos solúvel e que rapidamente se difunde, períodos mais dilatados poderão ocasionar erros notáveis nos resultados das análises.

2.3.5 ENSAIO GÁS-CROMATOGRÁFICO

A primeira fase da análise propriamente dita, consiste na extração pelo vácuo dos gases dissolvidos em pequenas quantidades de óleo Isolante da amostra representativa do equipamento.

Admite-se uma porção de óleo pré-determinada, em geral de 25 ml, e extraem-se os gases submetendo-se o óleo ao vácuo e a rigorosa agitação. Os gases que ocupam todo o espaço são em seguida comprimidos pela elevação de um nível e efetua-se a leitura do volume de gases extraídos numa haste calibrada à pressão e temperatura ambiente. Após a leitura do volume de gás, remove-se alíquotas da mistura de gases, para imediata injeção no Cromatógrafo.

Cromatógrafo é o nome dado ao equipamento utilizado para medir a concentração em ppm de cada gás.

Na maioria dos laboratórios são analisados nove gases, obtendo-se as sensibilidades para cada gás listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Gás Medido e Sensibilidade do Gás

Gases		Sensibilidade (ppm – vol. de gás/ vol. de óleo)
H ₂	Hidrogênio	0,5
O ₂	Oxigênio	0,7
N ₂	Nitrogênio	1,0
CH ₄	Metano	2,0
CO	Monóxido De Carbono	3,0
CO ₂	Dióxido De Carbono	3,0
C ₂ H ₄	Etileno	1,0
C ₂ H ₆	Etano	2,0
C ₂ H ₂	Acetileno	3,0
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre	(¹)

A concentração dos gases dissolvidos no óleo Isolante é expressa em partes por milhão (ppm) volume/volume de óleo, medidas à temperatura de 23 °C.

¹ Na Itaipu, devido à características particulares da instalação onde a bucha de alta tensão dos transformadores principais, transformadores elevadores ligados a saída dos geradores, está conectada a subestação isolada a gás SF₆ é medido o teor de hexafluoreto de enxofre (SF₆) no gás extraído do óleo isolante amostrado destas buchas.

Além da concentração de cada gás, calcula-se também a concentração total dos gases dissolvidos e a dos gases combustíveis.

A experiência considera satisfatória uma variação de 5% nos resultados em um mesmo laboratório, e 10 % entre laboratórios diferentes. Esporadicamente ocorre uma verificação entre laboratórios das empresas do setor elétrico brasileiro, onde são trocadas amostras de óleo entre estes laboratórios a fim de verificar a repetibilidade dos resultados obtidos para a mesma amostra por laboratórios diferentes.

Os gases combustíveis são os seguintes: monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), metano (CH_4), etileno (C_2H_4), etano (C_2H_6) e acetileno (C_2H_2), e os gases não combustíveis: oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), dióxido de carbono (CO_2).

2.3.6 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

"A interpretação dos resultados da análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante ainda é uma arte, pois atualmente não chega a ser uma ciência" [14].

Conforme afirmado por Milan Milasch [14] a interpretação dos resultados obtidos na análise cromatográfica ainda é uma arte, e cada empresa adota uma forma distinta de interpretação e ação a ser tomada.

A finalidade principal é a determinação da condição de operação do transformador. Para isto consideramos os seguintes aspectos relevantes:

- *Correlação com valores anteriores:* correlacionar os resultados da análise com os resultados de análises anteriores do mesmo equipamento, verificando assim o incremento, ou taxa de evolução de cada gás; Seguindo orientação do GCOI (Grupo Coordenador para operação Interligada) [15], o valor máximo é de 10% de acréscimo ao mês, exceto para o gás acetileno (C_2H_2) cuja presença já é indicativo de falha, devido ao fato deste gás só ser gerado a temperatura superior a 700°C ; Com

estes valores pode ser traçada a curva de tendência de evolução de cada gás;

- *Concentração de Carbono*: verificar o valor resultante da relação entre dióxido de carbono e monóxido de carbono (CO/CO_2); Se esta relação for superior a 10 pode indicar degradação da celulose, porém ensaios adicionais são necessários, como medição do teor de 2-furfuraldeído;
- *Relações*: relações de gases de acordo com critérios preestabelecidos (por exemplo, Rogers, IEC, Duval, Dörnemburg, Doble ou Pugh, e Laborelec), é possível identificar a falha incipiente que está se desenvolvendo, bem como a sua gravidade, antes que danos maiores possam ocorrer ao equipamento;

Para um completo entendimento das reais condições operativas do transformador em estudo faz-se necessário algumas observações.

Em defeitos evolutivos, além da velocidade de produção dos gases, a análise depende da velocidade com que os gases se dissolvem no óleo. O gás que não é dissolvido no óleo acumula-se no Relé Bucholz (de Gás).

Nos transformadores selados com bolsa ou membrana de borracha, os gases dissolvidos permanecem no óleo; nos transformadores selados com colchão de gás, os gases gerados se distribuem entre o óleo isolante e o colchão de gás; nos transformadores não-selados, que "respiram" através de um conservador equipado com sílica-gel, ou com "drycoll", parte dos gases gerados é perdida para a atmosfera.

2.3.7 PERIODICIDADE

A periodicidade a qual o óleo isolante contido em transformadores é submetido a análise cromatográfica de gases depende do critério adotado por cada concessionária de energia elétrica.

Fatores como tipo de transformador, existência e tipo de sistema de selagem (sistema que evita o contato do óleo isolante com o oxigênio contido na atmosfera), tensão,

potência, importância do transformador para o sistema elétrico ao qual está instalado, facilidade de acesso, existência ou não de um sistema on-line para medição de gases dissolvidos no óleo isolante, influenciam na decisão quanto a periodicidade de amostragem do óleo isolante.

Nos transformadores utilizados como fonte de pesquisa é adotada a periodicidade de 3 meses como intervalo entre as amostragens de óleo isolante para os transformadores elevadores conectados as unidades geradoras, e de 6 meses para os demais transformadores.

A periodicidade é alterada a qualquer momento, dependendo dos resultados obtidos nos ensaios de gas-cromatografia, podendo o intervalo entre coletas ser reduzido ou dilatado.

Amostras eventuais (situações especiais) são aquelas retiradas quando observadas taxas anormais de desenvolvimento de gases combustíveis e anomalias na composição dos gases em evolução, que indicam o desenvolvimento de defeitos incipientes ou em estágio mais avançado. Nestas condições, a análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo é realizada em períodos relativamente curtos, mediante um programa de amostragem aplicado especificamente ao equipamento em acompanhamento.

2.3.8 IMPORTÂNCIA COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

A análise cromatográfica de gases dissolvidos no óleo mineral isolante, constitui hoje o principal instrumento de detecção de defeitos incipientes nos equipamentos em operação.

Em sua grande maioria os defeitos vão evoluindo paulatinamente, sendo possível a sua identificação quanto ao tipo e gravidade, pela monitoração programada do desempenho dos equipamentos através da análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo.

Há falhas abruptas que acarretam prejuízos graves para o transformador, e que não podem ser evitadas nem previstas através da análise cromatográfica. Entretanto, este tipo de defeito constitui a exceção.

Sempre que o profissional de manutenção conseguir intervir no equipamento, quer inspecionado-o, executando ensaios complementares ou até mesmo retirando o equipamento de operação, antevendo a falha, estará auferindo consideráveis benefícios a instalação física da central ou subestação, evitando acidentes com humanos e diminuindo custos para a empresa, considerando que um reparo tem custo reduzido frente ao custo de reposição de um equipamento que sofreu falha.

Em transformadores abrigados, instalados dentro de usinas, além do mencionado acima, ocorrendo a falha seguida de incêndio poderia causar o desligamento forçado de outras unidades geradoras.

2.3.9 RESULTADOS PRÁTICOS OBTIDOS NA ITAIPU BINACIONAL

A Itaipu Binacional realiza coleta e análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante extraído de seus transformadores desde o início do período de operação industrial de suas unidades geradoras, totalizando até o momento cerca de 8000 registros.

Estes dados estão armazenados em base de dados relacional, contendo além do registro dos valores obtidos nos gases mencionados na Tabela 2.1, dados cadastrais dos equipamentos observados e identificação da própria amostra.

Até o momento foi possível atuar de forma preditiva e retirar de operação 5 buchas de alta tensão, 525kV, instaladas nos transformadores elevadores, devido a detecção de valores anormais de gases combustíveis no ensaio de gás-cromatografia..

A Tabela 2.2 mostra os resultados obtidos na análise cromatográfica de gases dissolvidos de amostra extraída da bucha (525kV) instalada no transformador principal da unidade geradora número 12, fase A, onde foi possível antever a falha, evitando assim a possível explosão da bucha.



Tabela 2.2: Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante

Equipamento: Bucha H1 – TU12 fase A	Data:
Número de Série: 8101165	Folha de Medição:
Gases	Ppm
CO Monóxido De Carbono	530
H ₂ Hidrogênio	21321
CH ₄ Metano	7666
C ₂ H ₄ Etileno	3494
C ₂ H ₆ Etano	2788
C ₂ H ₂ Acetileno	3435
Total de gases combustíveis	42234
CO ₂ Dióxido De Carbono	8510
N ₂ Nitrogênio	29400
O ₂ Oxigênio	6300
SF ₆ Hexafluoreto de Enxofre	68
Total de Gases	86512
Ações tomadas: Substituída após verificação dos valores encontrados e consulta à NBR 7274.	
NBR 7274, Diagnóstico: Descarga de energia reduzida. Tipo de flaha mais provável: Centelhamento continuo no óleo devido a mas conexões de diferentes potenciais ou potenciais flutuantes. Ruptura dieletrica do óleo entre materiais sólidos.	
Resultado da inspeção: Detectado rompimento de algumas camadas da isolação de papel entre as folhas de alumínio, provocando centelhamento (descargas parciais) entre camadas.	

Normas e Critérios Sugeridos para Diagnóstico

3.1 Introdução

A análise dos resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia do óleo isolante retirado de transformadores de potência, ou qualquer outro equipamento elétrico que utilize este fluido como meio isolante e refrigerante é uma arte.

Diversos fatores influenciam na análise dos resultados e nem sempre o diagnóstico emitido como provável se confirma ou tem-se a possibilidade de confirmação física, isto é, inspeção interna ao equipamento para comprovação do proposto como causa do aparecimento de determinado gás dissolvido no óleo isolante.

Normas técnicas para interpretação dos valores obtidos nos ensaios de gás-cromatografia foram elaboradas por laboratórios, fabricantes de transformadores, concessionárias de energia elétrica e entidades responsáveis por elaboração de normas técnicas.

Cada empresa adota determinada norma ou critério como ferramenta de apoio a análise dos resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia, de acordo com o conhecimento de seus especialistas.

As normas ou critérios existentes servem como apoio a decisão, decisão esta que deve considerar outros fatores tais como condição operativa do transformador, carregamento, temperatura ambiente, histórico de falhas, desenho construtivo da parte ativa, tipo de conservação, selado ou não, tipo de selagem, periodicidade de amostragem, taxa de evolução de gases do equipamento e demais equipamentos da família, etc.

A maneira de utilização de determinada norma consiste em entrar com os valores de concentração dos gases em ppm (parte por milhão) obtidos no ensaio de gás-cromatografia nas tabelas propostas por cada norma ou critério.

A seguir é mostrado um exemplo prático de aplicação do critério proposto pela NBR 7274 [12].

- **1º passo:** Obter as concentrações dos gases medidos durante análise cromatográfica, resultados mostrados na Tabela 3.1.

Como exemplo são utilizados resultados de ensaio de gás-cromatografia obtidos a partir do óleo isolante amostrado do registro inferior do transformador principal da unidade 12 em 12 de outubro de 1990.

- **2º passo:** Obter as tabelas para tratamento dos dados, proposta pela norma, na Tabela 3.2 são mostradas as relações utilizadas pela norma para dividir os possíveis resultados em patamares, na Tabela 3.3 são mostrados os diagnósticos possíveis de serem obtidos com a utilização da norma.

Tabela 3.1: Concentração de gases dissolvidos

Equipamento: Transformador Principal TU17 fase A		Data: 12/10/1990
Número de Série: 100296/2		Folha de Medição: 00061/1991
Gases		Ppm
CO	Monóxido De Carbono	50
H ₂	Hidrogênio	3
CH ₄	Metano	1
C ₂ H ₄	Etileno	1
C ₂ H ₆	Etano	0
C ₂ H ₂	Acetileno	0
Total de gases combustíveis		55
CO ₂	Dióxido De Carbono	6050
N ₂	Nitrogênio	25000
O ₂	Oxigênio	70
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre	0
Total de Gases		31175

Tabela 3.2: Relações propostas pela norma NBR 7274

	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
0.1 > R	0	1	0
0.1 ≤ R < 1	1	0	0
1 ≤ R < 3	1	2	1
R ≥ 3	2	2	2

Tabela 3.3: Diagnóstico proposto conforme Relações Norma NBR 7274

Diagnóstico	Relações		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Sem falha	0	0	0
Descargas Parciais baixa energia	0	1	0
Descargas Parciais alta energia	1	1	0
Descargas de baixa energia	1	0	1
Descargas de alta energia	1	0	2
Descargas de baixa energia	2	0	1
Descargas de baixa energia	2	0	2
Falha térmica baixa (<150 °C)	0	0	1
Falha térmica média (150 – 300°C)	0	2	0
Falha Térmica alta (300 – 700°C)	0	2	1
Falha Térmica muito alta (>700°C)	0	2	2

- **3º passo:** Utilizando as equações 1, 2 e 3, obtidas a partir da Tabela 3.2 calcular o valor das relações e aplicar os resultados obtidos na Tabela 3.3. Obtém-se assim a formação da Tabela 3.4.

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0 \quad (\text{Equação 1})$$

$$\frac{CH_4}{H_2} = 0.33 \quad (\text{Equação 2})$$

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 0 \quad (\text{Equação 3})$$

Tabela 3.4: Resultados obtidos para as relações propostas pela NBR 7274

	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
$0.1 > R$	0		0
$0.1 \leq R < 1$		0	
$1 \leq R < 3$			
$R \geq 3$			

- **4º passo:** De acordo com a relação obtida na Tabela 3.4, ressaltada em cor amarelo, {0,1,2}, verifica-se na Tabela 3.5 o diagnóstico correspondente a esta relação

Tabela 3.5: Diagnóstico proposto para o exemplo, conforme NBR 7274

Diagnóstico	Relações		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Sem falha	0	0	0
Descargas Parciais baixa energia	0	1	0
Descargas Parciais alta energia	1	1	0
Descargas de baixa energia	1	0	1
Descargas de alta energia	1	0	2
Descargas de baixa energia	2	0	1
Descargas de baixa energia	2	0	2
Falha térmica baixa (<150 °C)	0	0	1
Falha térmica média (150 – 300°C)	0	2	0
Falha Térmica alta (300 – 700°C)	0	2	1
Falha Térmica muito alta (>700°C)	0	2	2

- *Resultado obtido:*

Diagnóstico obtido para a relação 0-0-0: "*sem falha*"

3.2 Normas e Métodos existentes

Existem diversas normas ou critérios sugeridos por entidades normativas, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas, laboratórios e pesquisadores.

Entre os métodos ou normas existentes, este trabalho mencionará as normas ou critérios apresentados no sub-comitê de manutenção, SCM-47, [15]:

- Norma NBR 7274;
- Critério de Rogers;
- Critério desenvolvido pelo Laborelec;
- Critério de Duval;
- Critério de Dörnemburg;
- Critério de Pugh;
- Gases Chaves

Com a utilização, ou aplicação, deste métodos ou normas, obtém-se um diagnóstico provável do tipo de falha interna a que o equipamento está submetido.

3.2.1 MÉTODO NBR 7274/1982

Esta norma descreve como as concentrações dos gases formados pela degradação do óleo ou da isolação sólida, causada por descargas elétricas ou solicitações térmicas de transformadores imersos em óleo, podem ser interpretadas para diagnosticar o estado de um transformador e sugerir procedimentos futuros a serem adotados.

Esses métodos de interpretação apresentados na norma NBR7274/1982, foram desenvolvidos para transformadores de potência, com enrolamento de cobre, isolados com papel, papelão ou celulose e imersos em óleo isolante mineral, em serviço em sistemas de potência. Embora os métodos possam, em princípio, ser aplicados a outros tipos de equipamentos, como transformadores de instrumentos, cabos a óleo e equipamentos de manobra, ou a transformadores durante ensaios em fábrica, antes de estabelecer interpretações e limites convenientes, é necessário que seja adquirida maior experiência.

Em todos os casos, a indicação obtida precisa ser vista apenas como um guia e qualquer ação resultante deve ser tomada em função dos imperativos da utilização.

A norma apresenta duas tabelas, na Tabela 3.6 as relações entre os gases acetileno e etileno, metano e hidrogênio, e entre os gases etileno e etano; na Tabela 3.7 os diagnóstico propostos de acordo com a relação obtida na Tabela 3.6;

Tabela 3.6: Relações propostas pela norma NBR 7274/1982

	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
$0.1 > R$	0	1	0
$0.1 \leq R < 1$	1	0	0
$1 \leq R < 3$	1	2	1
$R \geq 3$	2	2	2

Notas referentes a Tabela 3.7:

- O código utilizado para as relações é dado na Tabela 3.6, onde, para efeito de codificação, as relações com denominador igual a zero são consideradas iguais a zero;
- Os valores dados para as relações devem ser considerados apenas como típicos;

- c) Nesta tabela 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;
- d) Neste caso os gases provêm principalmente da degradação da isolação sólida, o que explica o valor da relação C_2H_4/C_2H_6 ;
- e) Este tipo de falha é indicada normalmente por um aumento da concentração de 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 quantidade do óleo;
- f) Um aumento da concentração de C_2H_2 pode indicar que a temperatura do ponto quente é superior a $1000^\circ C$;
- g) Os transformadores equipados com comutador de tensão sob carga podem indicar falhas do tipo 202/102 se os produtos de decomposição formados pelos arcos no comutador puderem se difundir no óleo do tanque principal do transformador;
- h) Na prática podem ocorrer combinações de relações diferentes da tabela. Para estes casos deve-se considerar a taxa de crescimento e/ou os perfis típicos de composição.

Tabela 3.7 : Diagnóstico proposto pela norma NBR 7274/1982

Diagnóstico	Relações		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Sem falha	0	0	0
Descargas Parciais baixa energia	0	1	0
Descargas Parciais alta energia	1	1	0
Descargas de baixa energia (ver nota c)	1	0	1
Descargas de alta energia	1	0	2
Descargas de baixa energia	2	0	1
Descargas de baixa energia	2	0	2
Falha térmica baixa ($<150^\circ C$) (ver nota d)	0	0	1
Falha térmica média ($150 - 300^\circ C$) (ver nota e)	0	2	0
Falha Térmica alta ($300 - 700^\circ C$)	0	2	1
Falha Térmica muito alta ($>700^\circ C$) (ver nota f)	0	2	2

3.2.2 CRITÉRIO DE ROGERS

O critério de Rogers, NBR7274 [12], é semelhante à norma NBR7274, quanto a sua apresentação, e apresenta duas tabelas: na Tabela 3.8 as relações entre os gases acetileno e etileno, metano e hidrogênio, etileno e etano, e entre os gases etano e metano; na Tabela 3.9 os diagnósticos propostos de acordo com a relação obtida na Tabela 3.8;

Tabela 3.8: Relações propostas pelo critério de ROGERS

Relações				
	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
$0.1 > R$	5	0	0	0
$0.1 \leq R < 1$	0	0	0	1
$1 \leq R < 3$	1	1	1	1
$R \geq 3$	2	1	2	2

Tabela 3.9 : Diagnóstico proposto pelo critério de ROGERS

Diagnóstico	Relações			
	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
Deterioração Normal	0	0	0	0
Descargas Parciais baixa energia	5	0	0	0
Descargas Parciais alta energia	5	0	0	1
Descargas de baixa energia, arco sem potência	0	0	0	1
Descargas de baixa energia: potencial em flutuação	0	0	1	1
Descargas de baixa energia: potencial em flutuação	0	0	1	2
Descargas de alta energia	0	0	2	1
Descargas de alta energia	0	0	2	2
Sobreaquecimento de condutor isolado	0	0	1	0
Falha térmica baixa ($<150^\circ\text{C}$)	0	1	0	0
Falha térmica média ($100 - 200^\circ\text{C}$)	0	1	0	0
Falha térmica média ($100 - 200^\circ\text{C}$)	1	1	0	0
Falha térmica média ($100 - 200^\circ\text{C}$)	2	1	0	0
Falha térmica alta ($150 - 300^\circ\text{C}$)	1	0	1	0
Falha térmica muito alta ($300 - 700^\circ\text{C}$)	1	0	2	0
Falha térmica muito alta ($300 - 700^\circ\text{C}$)	2	0	2	0

3.2.3 Critério de Dörnemburg

Segundo Binda [11] este método de análise é baseado em diagnósticos genéricos para identificação de três tipos de falhas: Pontos quentes, descargas elétricas (exceto descargas internas) e descargas Internas (são descargas parciais que ocorrem em bolhas de ar).

Este critério mostra em uma mesma tabela as relações e os diagnósticos propostos, a Tabela 3.10 com as relações e diagnóstico foi extraída de [15].

Tabela 3.10 : Relações e diagnóstico pelo critério de Dörnemburg

Diagnóstico	Relações			
	A	B	C	D
Pontos quentes	> 0.1	< 1	> 0.2	< 0.1
Descargas elétricas (exceto descargas internas)	0.01 a 0.1	> 1	< 0.2	> 0.1
Descargas Internas	<0,01	---	> 0.2	< 0.1

onde $A = (CH_4/H_2) * 0.127$, $B = (C_2H_2/C_2H_4) * 1.44$, $C = (C_2H_6/C_2H_2) * 0.47$ e $D = (C_2H_2/CH_4) * 0.359$

3.2.4 CRITÉRIO DE DUVAL

Conforme Binda [11], este método de análise é baseado em diagnósticos genéricos para identificação de quatro tipos de falhas: Ponto quente, arco de alta energia, arco de baixa energia e descargas internas. Por serem diagnósticos genéricos, tem-se a possibilidade de serem obtidos diagnósticos indicativos de defeito em equipamentos que apresentam condições normais e operação. Assim este critério deverá ser sempre usado em conjunto com os critérios de Rogers e/ou NBR 7274 e/ou Laborelec.

O método trabalha relacionando os percentuais obtidos para os gases metano, acetileno e etileno em relação ao total encontrado destes mesmos gases em uma amostra de óleo isolante, equações 4, 5 e 6.

$$m\% = 100 \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (\text{Equação 4})$$

$$a\% = 100 \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (\text{Equação 5})$$

$$y\% = 100 \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (\text{Equação 6})$$

Este critério mostra em na Tabela 3.11 as relações e os diagnósticos propostos extraídos de [15].

Tabela 3.11 :Relações e diagnóstico pelo critério de Duval

Relações e diagnóstico			
Tipo de Falha	M	a	y
Pontos quentes	0-96	0-16	0-100
Arco de alta energia	0-59	16-75	25-84
Arco de baixa energia	0-84	16-100	0-25
Descargas internas	96-100	0-4	0-4

3.2.5 MÉTODO DE ANÁLISE PROPOSTO PELO LABORELEC (BÉLGICA)

Segundo a revisão do SCM 047 [15], o método desenvolvido pelo LABORELEC, embora baseado no mesmo princípio de outros métodos, difere dos demais pelo fato de se utilizar da relação CH_4/H_2 , do mesmo modo que usa o teor de hidrogênio, a concentração de monóxido de carbono e o teor total de hidrocarbonetos ($CH_4 + C_2H_4 + C_2H_6$)

A classificação descrita na Tabela 3.12 pode ser estabelecida como base para determinação das causas da degradação (descargas parciais, arco, degradação térmica), para avaliar a gravidade e identificar o tipo de material envolvido (óleo, papel ou ambos).

A informação contida na Tabela 3.13 dá a orientação para a frequência do ensaio e para as ações a serem tomadas.

Este método utiliza a relação e concentração de gases dissolvidos no óleo isolante detectados pela análise cromatográfica, para identificação do tipo e gravidade do defeito.

Tabela 3.12 : Classificação segundo o critério Laborelec

Concentração, ppm		CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₂	CO	Índice
H ₂	ΣC ₁ +C ₂				
≤ 200	≤ 300			≤ 400	A
201-300	≤ 300	≤ 0.15			B ₁
		0.16-1.0	≤ 20		B ₂
		0.16-1.0	> 20		B ₃
≤ 200	301-400	≥ 0.61		≤ 400	B ₄
		≥ 0.61		> 400	B ₅
		≤ 0.60	> 20	≤ 400	B ₆
		≤ 0.60	> 20	> 400	B ₇
201-300	301-400		> 20		B ₃
			≤ 20		B ₄
≤ 200	≤ 300			> 400	B ₉
301-600	≤ 400	≤ 0.15			C ₁
		0.16-1.0	≤ 50		C ₂
		0.16-1.0	> 50		C ₃
≤ 300	401-800	≥ 0.61		≤ 500	C ₄
		≥ 0.61		> 500	C ₅
		≤ 0.60	> 50	≤ 500	C ₆
		≤ 0.60	> 50	> 500	C ₇
301-600	401-800		> 50		C ₈
			≤ 50	≤ 500	C ₄
			≤ 50	> 500	C ₅
≥ 601	≤ 800	≤ 0.15			D ₁
		0.16-1.0	≤ 50		D ₂
		0.16-1.0	> 50		D ₃
≤ 600	≥ 801	≥ 0.61		≤ 700	D ₄
		≥ 0.61		> 700	D ₅
		≤ 0.60	> 50	≤ 700	D ₆
		≤ 0.60	> 50	> 700	D ₇
≥ 601	≥ 801		> 100		D ₈
			≤ 100	≤ 700	D ₄
			≤ 100	> 700	D ₅
Amplitude da degradação A – Normal B – Media C – Importante D – Muito		Definição da degradação 1: Descargas parciais (óleo) 2: Centelhamento (óleo) 3: Centelhamento (óleo) ou Gás proveniente do comutador 4: Térmica (óleo) 5: Térmica (óleo + papel) 6: Térmica (óleo) ou Gás proveniente do comutador 7: Térmica (óleo+papel) ou Gás proveniente do comutador 8: Arco no óleo ou Gás proveniente do comutador 9: Térmica (papel)			

Nota: $\Sigma C_1 + C_2 = CH_4 + C_2H_4 + C_2H_6$

Tabela 3.13 : Recomendações segundo critério Laborelec

Frequência do ensaio e ações a serem tomadas	
Índice	Frequência de Ensaio / Ação a ser tomada
A	Evolução Normal
B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₅ , B ₇ , B ₉	Próximo controle: Entre 6 e 12 meses
C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₆ , C ₇ , C ₈	Próximo controle: Entre 3 e 6 meses
D	Para todos os índices "D" – próximo controle entre 1 e 3 meses
D ₁	Nova medição do nível de descargas parciais no transformador
D ₂ , D ₃	Possíveis gases formados no LTC, senão, inspecionar as conexões do transformador
D ₄ , D ₅ , D ₆ , D ₇	Possíveis gases formados no LTC, senão, inspecionar as conexões (pontos quentes) e revisão no sistema de resfriamento
D ₈	Inspeção nas conexões/determinação da resistência de isolamento (se valor baixo, considerar um reparo em oficina). Para o transformador reentrar em operação promover desgaseificação e retornar ao esquema de amostragem normal.

3.2.6 CRITÉRIO DE PUGH

Segundo Binda [11] este método baseia-se em experiências realizadas em laboratório, e neste método o autor atribui a cada tipo de falha um gás-chave associado em maior ou menor proporção a outros gases.

São os seguintes os critérios de diagnóstico:

- *Arco*: gás-chave acetileno (C₂H₂). Formam-se grandes quantidades de Hidrogênio (H₂) e Acetileno (C₂H₂), acompanhado de pequena evolução de Metano (CH₄) e Etileno (C₂H₄). Se a celulose for envolvida também haverá aumento de Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO₂). Sob a ação do arco o óleo se decompõe por pirólise, com formação de carbono coloidal, que se dispersa no óleo;
- *Corona*: Gás chave Hidrogênio (H₂). Sob a ação de descargas elétricas de baixa energia formam-se grandes quantidades de Hidrogênio (H₂) e em menor escala haverá a formação de Metano (CH₄). Se as descargas atingirem a celulose haverá evolução de Monóxido de Carbono (CO) e

Dióxido de Carbono (CO_2), e os gases indicadores são Hidrogênio (H_2) e Monóxido de Carbono (CO);

- a evolução de grande quantidade de Hidrogênio (H_2), sem que haja evolução anormal de Metano (CH_4), pode caracterizar eletrólise da água existente no óleo. Não confundir este tipo de falha com o de corona;
- *Superaquecimento do óleo*: gás-chave Etileno (C_2H_4). Sob efeito de altas temperaturas o óleo isolante se decompõe, formando Etileno (C_2H_4) e Metano (CH_4), junto com pequenas quantidades de Hidrogênio (H_2) e Etano (C_2H_6). Se o ponto quente apresenta temperatura acima de 700°C , haverá formação de pequenas quantidades de Acetileno (C_2H_2);
- *Superaquecimento da celulose*: gás-chave Monóxido de Carbono (CO). Sob o efeito de altas temperaturas, a celulose libera grandes quantidades de Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO_2). Estando o isolamento celulósico impregnado com óleo mineral haverá pequena evolução de Metano (CH_4) e Etileno (C_2H_4).

3.2.7 CRITÉRIO A PARTIR DOS GASES CHAVES

O diagnóstico a partir da análise dos gases chaves tem fundamento na natureza e quantidades relativas de gás, produzidas pela decomposição de óleo sob diferentes condições de efeito; é necessário ter em mente que em um grande transformador o óleo sozinho ou como impregnante está presente em qualquer local onde possa se desenvolver um defeito.

Dependendo da condição da falha é gerada uma combinação de gases diferentes, com um gás predominante, a este gás denomina-se gás chave.

A NBR7274 [12], apresenta em seu anexo A - figuras e tabelas, associações entre os gases chaves e as falhas associadas a estes gases, conforme segue:

- Falha característica: **ARCO**

Grandes quantidades de hidrogênio e acetileno são produzidas, com pequenas quantidades de metano e etileno. Dióxido e monóxido de carbono também podem ser formados caso a falha envolva a celulose. O óleo poderá ser carbonizado.

No Gráfico 3.1 são mostradas as concentrações percentuais de cada gás-chave na análise cromatográfica, com maiores concentrações de hidrogênio e acetileno.

Gás-chave: Acetileno

- Falha característica: **DESCARGAS PARCIAIS**

Descargas elétricas de baixa energia produzem hidrogênio e metano, com pequenas quantidades de etano e etileno. Quantidades comparáveis de monóxido e dióxido de carbono podem resultar de descargas em celulose.

No Gráfico 3.2 são mostradas as concentrações percentuais de cada gás-chave na análise cromatográfica, com maiores concentrações de hidrogênio e metano.

Gás-chave: Hidrogênio

- Falha característica: **ÓLEO SUPERAQUECIDO**

Os produtos de decomposição incluem etileno e metano, juntamente com quantidades menores de hidrogênio e etano. Traços de acetileno podem ser formados se a falha é severa ou se envolve contatos elétricos.

No Gráfico 3.3 são mostradas as concentrações percentuais de cada gás-chave na análise cromatográfica, com maiores concentrações de etileno, etano e metano.

Gás-chave: Etileno

- Falha característica: **CELULOSE SUPERAQUECIDA**

Grandes quantidades de dióxido e monóxido de carbono são liberados da celulose superaquecida. Hidrocarbonetos gasosos, como metano e etileno, são formados se a falha envolver uma estrutura impregnada em óleo.

No Gráfico 3.4 são mostradas as concentrações percentuais de cada gás-chave na análise cromatográfica, com maiores concentrações de monóxido de carbono e pequena quantidade de hidrogênio.

Gás-chave: monóxido de carbono

- Falha característica: **ELETRÓLISE**

A decomposição eletrolítica da água ou a decomposição da água associada com a ferrugem resulta na formação de grandes quantidades de hidrogênio, com pequenas quantidades dos outros gases combustíveis

No Gráfico 3.5 são mostradas as concentrações percentuais de cada gás-chave na análise cromatográfica, com maior concentração de hidrogênio e concentração percentual quase nula dos demais gases.

Para confirmação de eletrólise deve ser verificada a concentração de água no óleo isolante.

Gás-chave: Hidrogênio

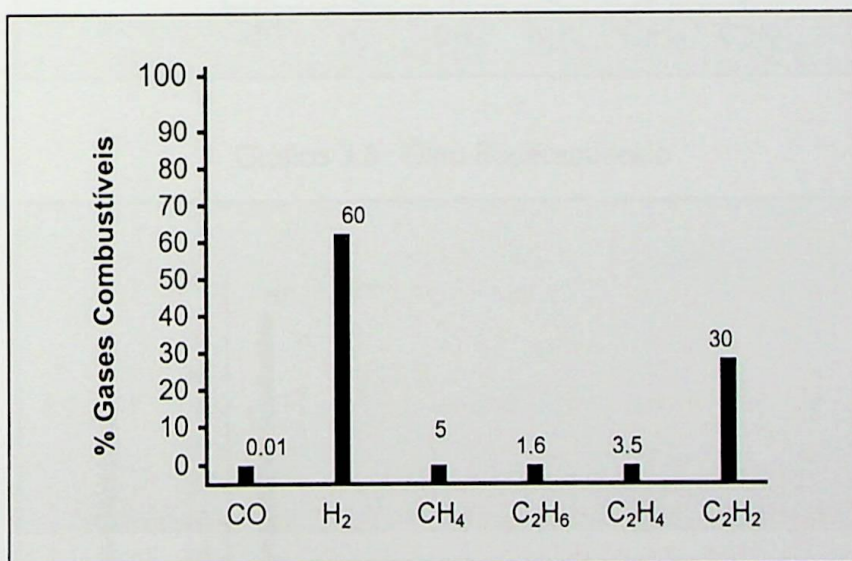


Gráfico 3.1 : Arco no óleo

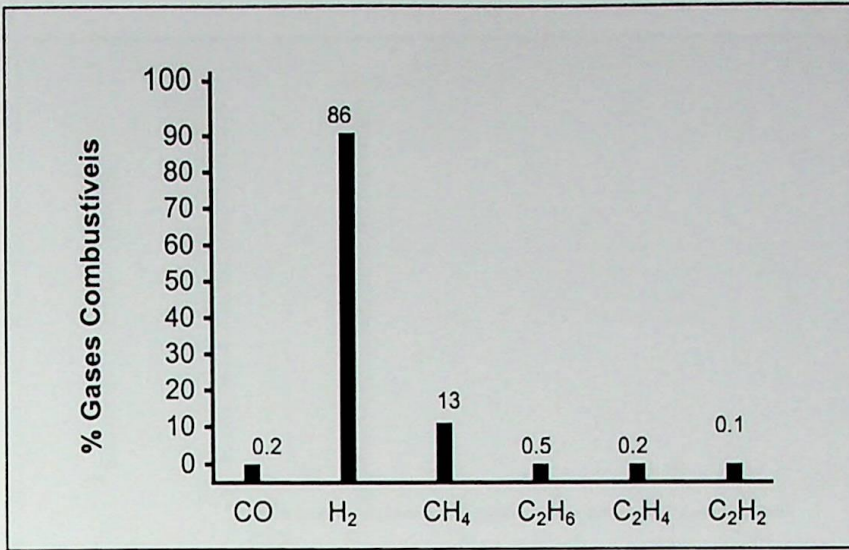


Gráfico 3.2 : Descargas Parciais

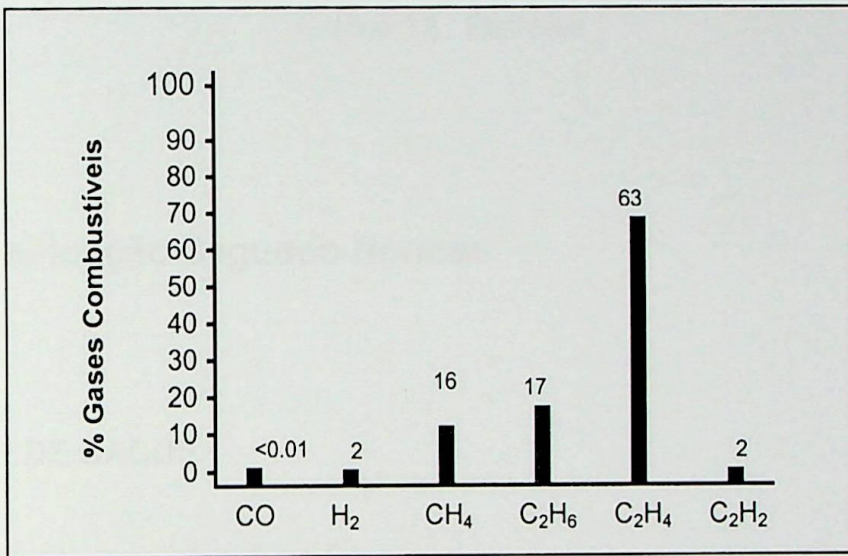


Gráfico 3.3 : Óleo Superaquecido

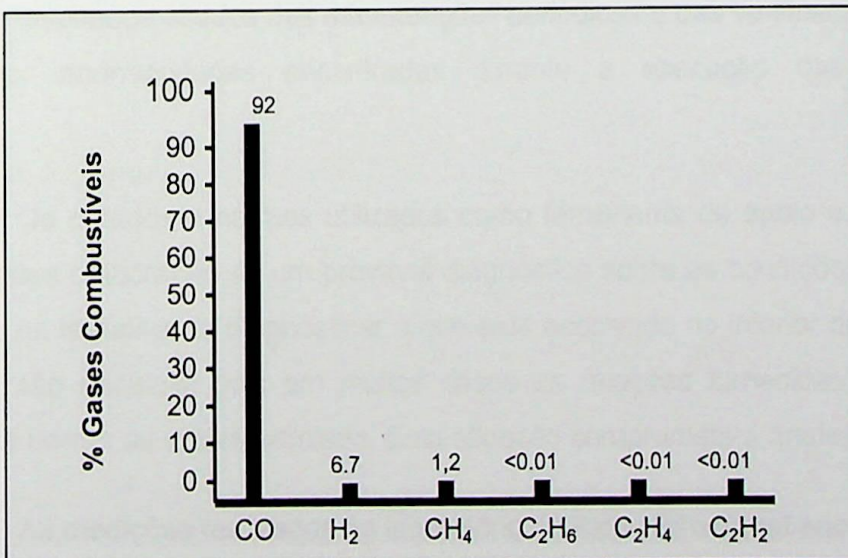


Gráfico 3.4 : Celulose Superaquecida

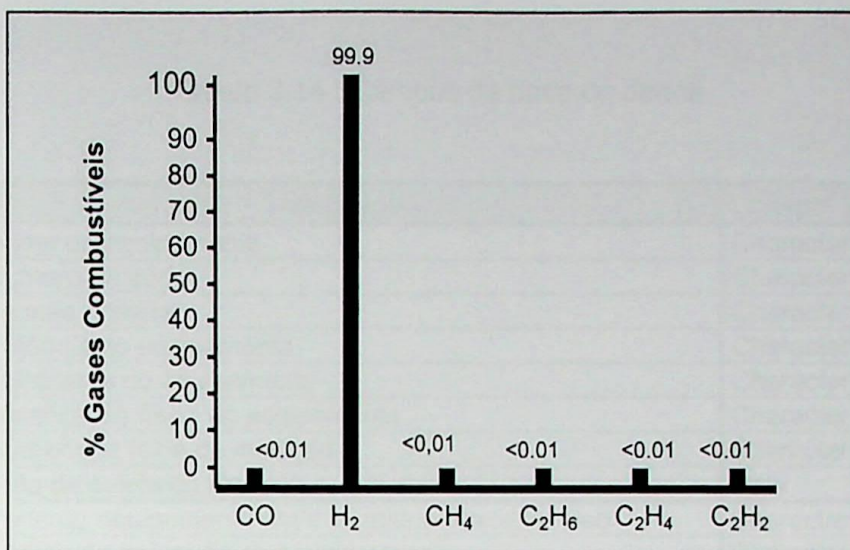


Gráfico 3.5 : Eletrólise

3.3 Classificação Segundo Normas

3.3.1 BASE DE DADOS

A análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante é feita em Itaipu desde a recepção dos primeiros transformadores, no início dos anos 80. A base de dados é composta por resultados obtidos das manutenções periódicas e das verificações aperiódicas motivadas por anormalidades encontradas durante a execução das manutenções periódicas.

Os critérios e normas utilizados como ferramenta de apoio a engenharia de manutenção para elaboração de um provável diagnóstico sobre as condições operativas do equipamento, na tentativa de diagnosticar o que está ocorrendo no interior do equipamento, nem sempre são eficazes, pois em muitos casos as relações fornecidas não alcançam diagnóstico na norma ou critério utilizado. Esta situação compromete a análise do problema.

As medições realizadas no laboratório da Itaipu Binacional encontram-se armazenadas em um banco de dados relacional, cerca de 7822 registros de transformadores de potência, composto pelos campos descritos na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 : Campos da base de dados

Descrição	Tipo
Nome do equipamento	Character
Numero de série	Character
Tensão nominal	Character
Potência do equipamento	Character
Fabricante do equipamento	Character
Localização física do equipamento	Character
Número da folha de medição	Character
Data da coleta do óleo	Date
Parte do equipamento onde foi feita a coleta de óleo	Character
Código de operação do equipamento	Character
Temperatura ambiente	Character
Umidade ambiente	Character
Monóxido de carbono (CO)	Integer
Hidrogênio (H ₂)	Integer
Metano (CH ₄)	Integer
Etileno (C ₂ H ₄)	Integer
Etano (C ₂ H ₆)	Integer
Acetileno (C ₂ H ₂)	Integer
Total de gases combustíveis	Integer
Oxigênio (O ₂)	Integer
Nitrogênio (N ₂)	Integer
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Integer
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	Integer
Total de gases	Integer
Data da análise	Date
Químico responsável	Character
Análise dos resultados	Character
Modelo	Character
Data Fabricação	Date
Data energização	Date
Família	Character

3.3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

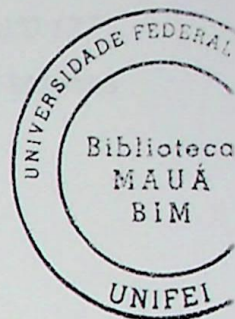
A partir da base de dados disponível para teste, composta de 7822 casos, foram aplicadas as normas e ou critérios disponíveis para emissão de diagnósticos, com a totalização dos diagnósticos emitidos.

3.3.2.1 Método NBR 7274/1982

Este método utiliza as seguintes relações para estabelecer o diagnóstico: C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_4/C_2H_6 , CH_4/H_2 , após classificar todas as análises armazenadas utilizando este método obtém-se os totais anotados na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 : Classificação do histórico utilizando a NBR 7274/1982

Diagnóstico	Incidência (%)
Sem falha	26.822
Descargas Parciais baixa energia	7.159
Descargas Parciais alta energia	0.665
Descargas de baixa energia	2.301
Descarga de alta energia	0.332
Falha térmica de baixa temperatura (<150 °C)	3.989
Falha térmica de baixa temperatura (150 – 300°C)	33.252
Falha Térmica de temperatura média (300 – 700°C)	9.0
Falha Térmica de alta temperatura (>700°C)	4.922



Do total de 7822 amostras, observa-se que em 11.557 % dos casos não obtém-se diagnóstico utilizando a NBR 7274/1982.

3.3.2.2 Critério de Rogers

Este método utiliza as seguintes relações para estabelecer o diagnóstico: C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_4/C_2H_6 , C_2H_6/CH_4 , CH_4/H_2 , após classificar todas as análises armazenadas utilizando este método obtém-se os totais anotados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 : Classificação do histórico utilizando Rogers

Diagnóstico	Incidência (%)
Deterioração Normal	19.292
Descargas Parciais baixa energia	7.402
Descargas Parciais alta energia	0.499
Descargas baixa energia, arco sem potência	2.672
Descargas baixa energia: potencial em flutuação	1.317
Descargas alta energia	0.307
Sobreaquecimento de condutor isolado	1.879
Falha térmica baixa (<150°C)	10.573
Falha térmica media (100 – 200°C)	17.118
Falha térmica alta (150 – 300°C)	2.007
Falha térmica muito alta (300 – 700°C)	4.296

Do total de 7822 amostras, observa-se que em 32.639 % dos casos não são obtidos diagnósticos utilizando o critério de Rogers.

3.3.2.3 Critério de Dörnemburg

Este método utiliza as seguintes relações para estabelecer o diagnóstico: $(CH_4/H_2)*0.127$, $(C_2H_2/C_2H_4)*1.44$, $(C_2H_6/C_2H_2)*0.47$, $(C_2H_2/CH_4)*0.359$, após classificar todas as análises armazenadas utilizando este método obtém-se os totais anotados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 : Classificação do histórico utilizando Dörnemburg

Diagnóstico	Incidência (%)
Pontos quentes	8.847
Descargas elétricas (exceto descargas internas)	0.882
Descargas Internas	0.32

Do total de 7822 amostras, observa-se que em 89.951 % dos casos não são obtidos diagnósticos utilizando o critério de Dörnemburg.

3.3.2.4 Critério de Duval

Este método utiliza as seguintes relações para estabelecer o diagnóstico:

$$m\% = 100 \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4}, \quad a\% = 100 \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4}, \quad y\% = 100 \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4},$$

após classificar todas as análises armazenadas utilizando este método obtém-se os totais anotados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 : Classificação do histórico utilizando Duval

Diagnóstico	Incidência (%)
Pontos quentes	92.585
Arco de alta energia	2.672
Arco de baixa energia	1.355
Descargas internas	3.388

Do total de 7822 amostras, observa-se que em *todos* os casos são obtidos diagnósticos utilizando o critério de Duval.

3.3.2.5 Método de análise proposto pelo LABORELEC (Bélgica)

Este método utiliza as seguintes relações para estabelecer o diagnóstico: H_2 , CH_4/H_2 , C_2H_2 , CO , $(CH_4+C_2H_4+C_2H_6)$ após classificar todas as análises armazenadas utilizando este método obtém-se os totais anotados na Tabela 3.19.

Do total de 7822 amostras, observa-se que em 99,95% dos casos *obtem-se* diagnóstico utilizando o método proposto por LABORELEC.

Tabela 3.19 : Classificação do histórico utilizando LABORELEC

Diagnóstico		Incidência (%)
Amplitude da degradação	Definição da degradação	
Degradação Normal		94.375
Degradação Media	Descargas parciais (óleo)	0.780
Degradação Media	Centelhamento (óleo)	0.141
Degradação Media	Centelhamento (óleo) ou Gás proveniente do comutador	0.013
Degradação Media	Térmica (óleo)	0.217
Degradação Media	Térmica (óleo + papel)	0.013
Degradação Media	Térmica (óleo) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Media	Térmica (óleo+papel) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Media	Térmica (papel)	1.943
Degradação Importante	Descargas parciais (óleo)	0.486
Degradação Importante	Centelhamento (óleo)	0.051
Degradação Importante	Centelhamento (óleo) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Importante	Térmica (óleo)	0.933
Degradação Importante	Térmica (óleo + papel)	0.384
Degradação Importante	Térmica (óleo) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Importante	Térmica (óleo+papel) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Importante	Arco no óleo ou Gás proveniente do comutador	0.013
Degradação Muito Importante	Descargas parciais (óleo)	0.115
Degradação Muito Importante	Centelhamento (óleo)	0.0
Degradação Muito Importante	Centelhamento (óleo) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Muito Importante	Térmica (óleo)	0.153
Degradação Muito Importante	Térmica (óleo + papel)	0.205
Degradação Muito Importante	Térmica (óleo) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Muito Importante	Térmica (óleo+papel) ou Gás proveniente do comutador	0.0
Degradação Muito Importante	Arco no óleo ou Gás proveniente do comutador	0.128

Do total de 7822 amostras, observa-se que em *todos* os casos são obtidos diagnósticos utilizando o critério proposto por Laborelec.

3.3.2.6 Conclusão

Foram classificados todos os exemplos constantes da base de dados em cada um dos seguintes métodos ou critérios : NBR7274/1980, Rogers, Duval, Dornenburg e Laborelec, resultando nos totais mostrados.

Cada critério ou método sugerido expressa uma base de conhecimento traduzida por regras de entrada, relações de concentrações de determinados gases, e regras de saída, diagnóstico ou até mesmo sugestões de como proceder.

Cada resultado sem diagnóstico representa uma *falha na base de conhecimento* quanto a sua abrangência, isto é, existem situações onde a combinação das relações dos gases não satisfaz qualquer entrada de nossa base de conhecimento, portanto não existem saídas, isto equivale a dizer que nesses casos alguns métodos ou critérios não apresentaram diagnóstico ou sugestão.

Existe um elevado índice de *falhas nas bases de conhecimento*, demonstrado pelo elevado índice de amostras sem diagnóstico nos seguintes métodos ou critérios: NBR7274/1980 , Rogers, Dornenburg.

O fato de termos *falhas em algumas das bases de conhecimento* compromete a confiabilidade quanto a utilização da análise dos resultados obtidos na cromatografia gasosa como ferramenta de apoio a engenharia de manutenção, pois o diagnóstico é baseado em todos os conhecimentos disponíveis.

3.4 Proposta de Solução

Conforme observado em itens anteriores, o diagnóstico quanto ao correto funcionamento de transformadores de potência e demais equipamentos elétricos que tenham sua parte ativa imersa em óleo isolante, baseado no resultado obtido em ensaio de gas cromatografia do óleo isolante extraído destes equipamentos, segue sendo uma arte [14].

A obtenção de um diagnóstico preciso quanto a condição operativa destes equipamentos é uma arte pois a análise correta deve ser baseada em um conhecimento mais amplo, onde variáveis como: condição operativa (sobrecarga ou não), exigência quanto a surtos de manobra ou atmosféricos, tipo de material utilizado, tipo de sistema de refrigeração e, fundamentalmente, o conhecimento do histórico das análises cromatográficas já realizadas no óleo isolante extraído destes equipamentos, interferem na obtenção do diagnóstico preciso.

O diagnóstico fornecido por normas e critérios, mencionados no capítulo anterior, tais como: NBR7274, Rogers, Laborelec, Dornenburg, devem ser utilizados como indicativo de anormalidade no equipamento.

Como foi mostrado, observamos que algumas normas ou critérios de análise dos resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia, não fornecem diagnóstico para todas as combinações possíveis de resultados, isto é, dependendo da concentração obtida em ppm (parte por milhão) dos gases medidos no ensaio, determinada norma ou critério não emite diagnóstico.

Para ser obtida maior confiabilidade nos diagnósticos obtidos quando utilizadas as normas ou critérios aqui mencionados, tendo como dados de entrada os valores de concentração de cada gás (em ppm) obtidos no ensaio de gás-cromatografia, é necessário utilizar o maior número de ferramentas disponíveis para este fim.

A emissão de um parecer quanto à condição operativa de determinado equipamento, necessita de uma base de conhecimento ampla. Com esta finalidade é proposto um sistema que atenda os seguintes requisitos:

- *entradas* : concentração de gases em ppm obtidas no ensaio de cromatografia gasosa;
- *base de conhecimento*: o maior número de critérios e normas que contenham regras de entrada, relações de concentrações de determinados gases e tenham como saída propostas de diagnósticos;
- *saídas*: uma relação de diagnósticos possíveis, baseados nas normas e critérios de análises empregados.

A base de conhecimento está centrada na utilização de normas ou critérios para análise dos resultados obtidos no ensaio de gascromatografia gasosa e outros critérios de análise tais como:

- evolução de CO_2/CO ;
- evolução de hidrocarbonetos;
- evolução da família.

A degradação dos materiais celulósicos produz, de uma forma característica, dióxido de carbono e monóxido de carbono, assim como menores quantidades de outros gases. Entretanto para avaliar a significância destes 2 gases é necessário comparar com suas concentrações antes da falha, que podem ser elevadas em virtude de:

- degradação da celulose por envelhecimento normal;
- degradação devido a secagem em fábrica e processos de impregnação;
- transporte do transformador com CO_2 ;
- absorção de CO_2 da atmosfera, em transformadores com conservador aberto.

Na Figura 3.1, é mostrado o sistema proposto para emissão de diagnóstico quanto a condição operativa de equipamentos elétricos com o núcleo envolvido em óleo mineral isolante baseado em dados obtidos na análise cromatográfica de gases.

Nos transformadores com conservador aberto, a relação CO_2/CO tem um valor médio 7 (com grande dispersão, desvio padrão aproximadamente 4). Se essa relação for inferior a 3 ou superior a 11 e houver concomitante degradação excessiva do óleo, a possibilidade de defeito é grande e convém comparar com os valores obtidos anteriormente para o mesmo transformador, ou para outros do mesmo tipo e com carregamento semelhante [12].

Transformadores selados com gás ou com membrana ou bolsa no conservador, as concentrações de CO_2 e CO são pequenas. A relação CO_2/CO é geralmente inferior a 7 e aumentará com o envelhecimento normal [12].

Binda [11] afirma que a relação CO_2/CO situa-se normalmente entre 3 e 11. Entretanto, certos transformadores podem apresentar uma relação superior a 11, sem que isto indique obrigatoriamente uma deterioração acelerada do isolamento celulósico, porém

um aumento súbito nesta relação pode ser significativo de um ponto quente afetando a celulose.

Conforme SCM 019 [15] como valor de referência, uma taxa de evolução de gases combustíveis (hidrocarbonetos) menor de 10% ao mês, é considerada satisfatória, exceto para o gás acetileno que normalmente não é detectado em transformadores com condições normais de operação.

A evolução de cada gás combustível (hidrocarbonetos) em comparação a média do mesmo gás em estudo na família de equipamentos, também é uma indicação de anormalidade.

Entre os gases detectados no ensaio de cromatografia gasosa de óleo isolante retirado de transformadores, os hidrocarbonetos são os seguintes gases:

- Hidrogênio - H_2 ;
- Metano - CH_4 ;
- Etileno - C_2H_4 ;
- Etano - C_2H_6
- Acetileno - C_2H_2

A saída do sistema mostrará os diversos diagnósticos propostos por cada norma ou critério de análise.

Família de equipamentos são aqueles equipamentos de mesmo fabricante, de mesmas características nominais, mesmas condições operativas e tempo de vida similar.

Para consolidar algumas normas ou critérios como ferramentas adequadas ao uso no sistema proposto, existe a necessidade de alteração das relações propostas com a finalidade de eliminar ou reduzir o percentual de ensaios sem diagnóstico (falhas existentes na base de conhecimento).

A técnica a ser utilizada para redução do número de possibilidades sem diagnóstico em determinada norma é a Teoria dos Conjuntos Aproximados. Os resultados desta aproximação são mostrados no capítulo 5, e conforme observado na Tabela 5.3 e na Tabela 5.6, tanto na NBR 7274 quanto em Rogers, existem saídas do sistema (diagnósticos

propostos por estes critérios) com mais de uma possibilidade, após redução do número de entradas possíveis sem diagnóstico proposto (sem saída).

Para eliminar os múltiplos diagnósticos para uma mesma entrada (resultados de gases em ppm/vol obtidos no ensaio de cromatografia gasosa), os diagnósticos propostos pela NBR 7274 e Rogers após redução com a aplicação dos conceitos da teoria dos conjuntos aproximados, foram refinados com a utilização do conhecimento contido no método do gás-chave [12].

A técnica de inteligência artificial adotada para implementação do critério de gás-chave é chamada de Conjuntos Difusos (" Fuzzy Sets ").

Com a utilização do critério de gás-chave faz-se a escolha entre os diagnósticos propostos (quando múltiplos) utilizando regras extraídas do critério de gás-chave com a aplicação de conceitos empregados na teoria de Conjuntos Difusos.

A teoria sobre Conjuntos Aproximados, Conjuntos Difusos e como implementar estas técnicas de inteligência artificial ao problema proposto são mostradas no capítulo 4.

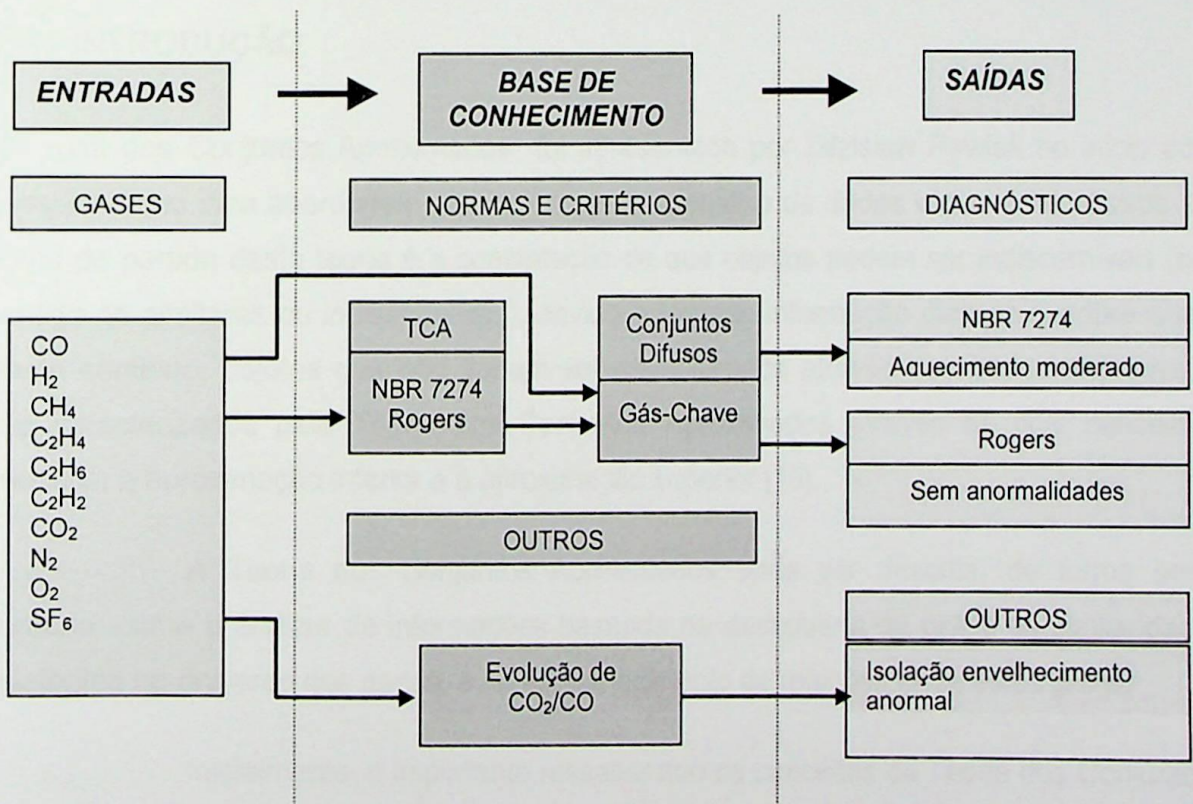


Figura 3.1 : Sistema de análise proposto.



Elementos das Teorias Utilizadas

4.1 Introdução

Existem diversas técnicas de Inteligência Artificial disponíveis para tratamento de incertezas ou busca de dados em bases de conhecimentos. Porém a técnica adotada neste trabalho foi a Teoria dos Conjuntos Aproximados ("Rough Sets"). Seus conceitos, o algoritmo de aplicação, bem como sua aplicação da técnica ao problema de análise de transformadores, são o objeto deste capítulo.

4.2 Conjuntos Aproximados ("Rough Sets")

4.2.1 INTRODUÇÃO

A Teoria dos Conjuntos Aproximados foi apresentada por Zdzislaw Pawlak no início dos anos 80 como uma abordagem matemática para a análise de dados vagos e imprecisos. O ponto de partida desta teoria é a constatação de que objetos podem ser indiscerníveis (no sentido de similares ou indistinguíveis), devido à limitada informação disponível sobre eles. Neste contexto, objetos que não podem ser especificados através dos dados disponíveis são caracterizados pela Teoria dos Conjuntos Aproximados através de dois conceitos precisos: a aproximação inferior e a aproximação superior [16].

A Teoria dos Conjuntos Aproximados pode ser descrita, de forma bem sumária, como a análise de informações baseada na descoberta de grãos de similaridade existentes no universo dos dados, e no estabelecimento de relações entre estes grãos.

Inicialmente, é importante ressaltar que os conceitos da Teoria dos Conjuntos Aproximados complementam, mas não competem com outros métodos. Eles podem ser

usados conjuntamente com outras abordagens como, por exemplo, Lógica Difusa, Algoritmos Genéticos, métodos estatísticos, Redes Neurais, etc.

A teoria é de fácil compreensão e aplicação. Diversos sistemas aplicativos baseados em Conjuntos Aproximados já foram implementados e muitas aplicações em diversas áreas do conhecimento foram relatadas [17].

Uma das principais vantagens apontadas na Teoria dos Conjuntos Aproximados é a dessa teoria não necessitar de qualquer informação adicional ou preliminar a respeito de dados, tais como é necessário o grau de pertinência ou valor de possibilidade na Teoria de Conjuntos Difusos [18].

Intuitivamente, conhecimento pode ser entendido como um corpo da informação sobre algumas partes da realidade, o qual constitui nosso domínio sobre o interesse. Esta definição, entretanto falha ao reunir um padrão de precisão e uma inspeção com múltiplos significados, tendendo para principalmente um desses significados dependendo do contexto e da área de interesse.

Por uma base de conhecimento pode-se entender um sistema relacional $k=(U,R)$, onde $U \neq 0$ é um conjunto finito chamado de universo, e R é uma família de relações equivalentes de U .

Os Sistemas Baseados em Conhecimento (SBC) devem ser capazes de representar, manipular e comunicar informações. É fato que tais sistemas devem estar preparados para modelar e tratar informações consideradas imperfeitas; muitas vezes o que se convencionou chamar de informações imperfeitas abrange informações imprecisas, inconsistentes, parcialmente ignoradas e mesmo incompletas [18].

A presença da incerteza em SBCs pode se originar de várias fontes: da confiabilidade parcial que se tem na informação, da imprecisão inerente da linguagem de representação na qual a informação é expressa, da não completeza da informação e da agregação/sumarização da informação que provêm de múltiplas fontes [19].

Neste capítulo mostra-se o básico da Teoria de Conjuntos Aproximados, as propriedades de conjuntos aproximados, conceitua-se conjuntos dispensáveis e indispensáveis, descreve-se conjunto redução e núcleo básico a fim de mostrar a teoria básica de Conjuntos Aproximados.

Concluindo este capítulo, é apresentado um algoritmo de classificação que utiliza os conceitos da Teoria dos Conjuntos Aproximados e um exemplo de aplicação deste algoritmo.

4.2.2 CONCEITOS BÁSICOS

Para melhor entender a Teoria dos Conjuntos Aproximados faz-se necessário a apresentação de alguns conceitos básicos sobre conjuntos.

Nicoletti [20] descreve que um conjunto S é definido como uma coleção bem-definida de objetos ⁽ⁱⁱ⁾. Os objetos de um conjunto são denominados *elementos* ou *pontos* desse conjunto. Se x é um elemento de S , escreve-se $x \in S$; caso contrário $x \notin S$. O conjunto que não possui nenhum elemento é chamado de *conjunto vazio* e notado por \emptyset ou $\{ \}$. Geralmente, indica-se um conjunto qualquer discriminando seus elementos entre chaves ou por uma regra que bem defina os seus elementos. É possível também utilizar uma representação gráfica em forma de diagramas.

Um conjunto X é dito *finito* se possui um número limitado de elementos, caso contrário é *infinito*. O conjunto vazio é finito. Dado um conjunto finito X , a *cardinalidade* de X , em símbolos $card(X)$ ou $|X|$, é definida como sendo o número de elementos de X . Note que $|\emptyset| = 0$.

Um conjunto S é dito *subconjunto* de um conjunto T se e somente se qualquer elemento de S é também elemento de T . Denota-se " S é *subconjunto* de T " por $S \subseteq T$. Se S é subconjunto de T , pode-se também dizer que T contém S e escrever $T \supseteq S$. Dois conjuntos S e T são iguais ($S = T$) se e somente se contém exatamente os mesmos elementos, i.e. $S \subseteq T$ e $T \subseteq S$. Quando se tem $S \subseteq T$ e $S \neq T$ então S é *subconjunto próprio* de T e indicado por $S \subset T$. Indica-se " S não é *subconjunto* de T " por $S \not\subseteq T$. Note que o conjunto vazio é subconjunto de qualquer conjunto. Denomina-se o conjunto de todos os possíveis subconjuntos de S por *Partes de S* ou *Conjunto Potência de S* e indica-se por 2^S .

ⁱⁱ Por coleção bem definida de objetos entende-se uma coleção de objetos distinguíveis e definíveis de acordo com a intuição ou o intelecto.

Dados dois conjuntos quaisquer S e T , define-se o *complementar* de S em T como o conjunto formado pelos elementos de T que não são elementos de S . Denota-se o *complementar* de S em T por $T - S$. Se U é um conjunto universo, e pode ser subentendido sem confusão, então $U - X$ pode ser notado por $(-X)$ ou simplesmente $-X$.

A *união* de dois conjuntos quaisquer S e T é o conjunto formado pelos elementos de S e T , indicado por $S \cup T = \{x \mid x \in S \text{ ou } x \in T\}$. Por sua vez, a *interseção* de S e T é o conjunto formado pelos elementos que pertencem a ambos S e T , indicado por $S \cap T = \{x \mid x \in S \text{ e } x \in T\}$.

Dados S e T conjuntos não-vazios, o *produto cartesiano* de S por T é o conjunto formado pelos pares ordenados (s,t) tal que $s \in S$ e $t \in T$, e é notado $S \times T = \{(s,t) \mid s \in S \text{ e } t \in T\}$. A notação pode ser estendida para n conjuntos.

A estrutura operacional da Teoria dos Conjuntos Aproximados é baseada em dois conjuntos denominados de "*aproximação inferior*" e "*aproximação superior*" e que são aqui denotados por $\underline{R}X$ e $\overline{R}X$, respectivamente [21].

Em um universo conhecido, estes conjuntos de dados ou conhecimentos propõem limitar a solução entre duas regiões, na região de aproximação inferior à solução proposta todos os elementos do conjunto fazem parte da proposta, e na região de aproximação superior os elementos possivelmente façam parte da solução.

Na Figura 4.1 e na Figura 4.2 é possível visualizar as regiões de aproximação inferior e superior, onde U é um conjunto universo e R uma relação de equivalência em U , definindo o espaço aproximado $A = (U, R)$. Seja também $X \subseteq U$.

Estes conceitos definem três regiões de interesse a saber: região positiva, região de fronteira e região negativa, assumindo a seguinte notação:

- Região positiva $POS_R(X)$;
- Região de fronteira $BN_R(X)$;
- Região negativa $NEG_R(X)$.

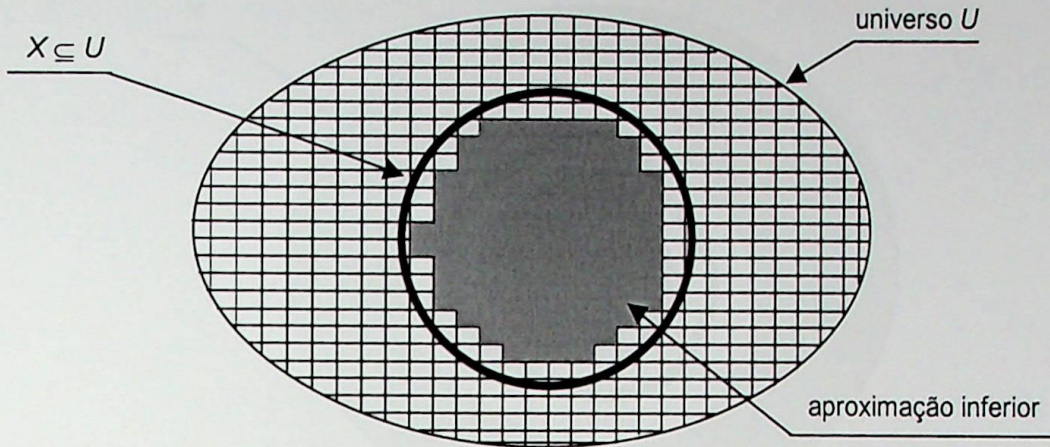


Figura 4.1: Região de aproximação inferior no universo U

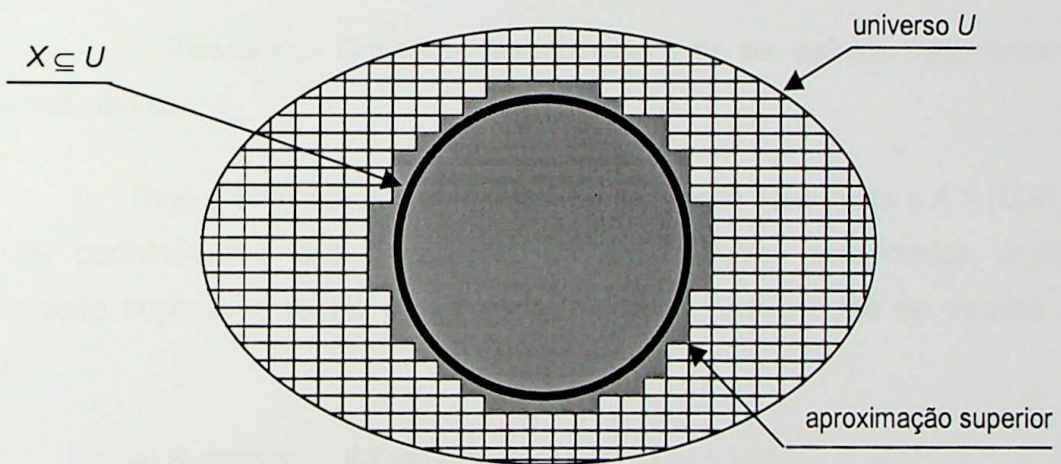


Figura 4.2: Região de aproximação superior no universo U

A Figura 4.3 representa as três regiões de interesse.

Observando a Figura 4.3 concluímos que a região positiva coincide com o conjunto de aproximação inferior, sendo composta portanto de elementos que fazem parte da solução do problema. A região de fronteira é a diferença entre os dois conjuntos de aproximação e é composta por elementos que podem ou não fazer parte da solução. Finalmente, a região negativa contém elementos que não fazem parte da solução.

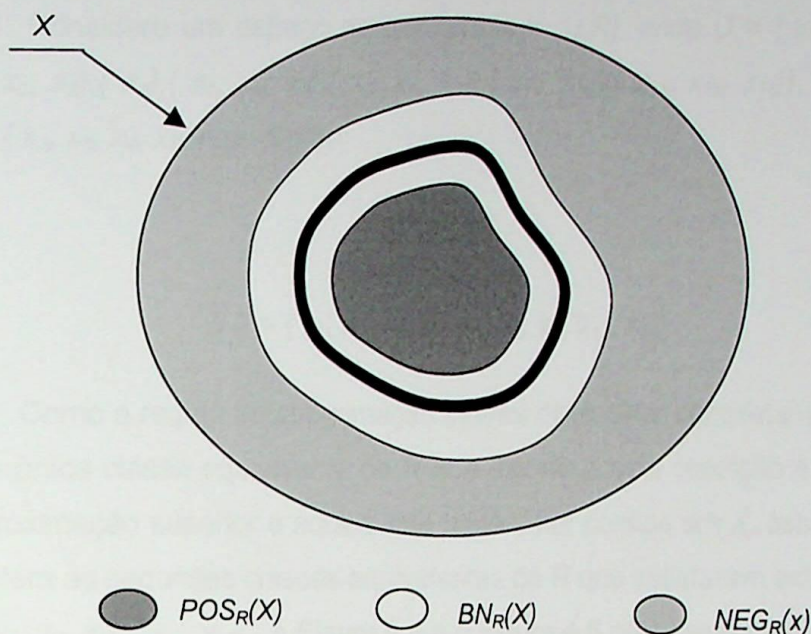


Figura 4.3: Regiões de interesse para a Teoria dos Conjuntos Aproximados

A Teoria dos Conjuntos Aproximados, pode ser definida matematicamente pela forma abaixo.

Seja o conjunto $X \subseteq U$, e seja R uma relação equivalente e $A = (U, R)$, uma base de conhecimento que os associa. Os dois conjuntos aproximados, região de aproximação superior e região de aproximação inferior, podem então ser escritos como sendo:

a) R-inferior: $\underline{R}X = \cup \{Y \in U/R : Y \subseteq X\}$

b) R-superior: $\overline{R}X = \cup \{Y \in U/R : Y \cap X \neq \emptyset\}$

Isto significa que os elementos pertencentes ao conjunto $\underline{R}X$ certamente podem ser classificados como elementos de X ; enquanto os pertencentes a $\overline{R}X$, possivelmente, podem vir a ser classificados como elementos de X .

Da mesma maneira, as regiões $POS_R(X)$, $BN_R(X)$ e $NEG_R(X)$ podem ser definidas :

- $POS_R(X) = \underline{R}X \quad \Rightarrow$ certamente membro de X
- $NEG_R(X) = U - \overline{R}X \quad \Rightarrow$ certamente não-membro de X
- $BN_R(X) = \overline{R}X - \underline{R}X \quad \Rightarrow$ possivelmente membro de X

Exemplo 4.1: Considere um espaço aproximado $A = (U, R)$, onde $U = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{15}\}$ e $U/R = \{\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9, x_{10}\}, \{x_{11}, x_{12}\}, \{x_{13}, x_{14}, x_{15}\}\}$. Seja também o conjunto $X = \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_{12}\}$. Então:

$$\underline{R}X = \{x_4\}$$

$$\overline{R}X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_{11}, x_{12}\}$$

Como a região de aproximação inferior deve estar completamente contida em X , portanto a única classe equivalente de R que atende a esta condição é $\{x_4\}$, e como a região de aproximação superior é aquela que pode estar contida em X , assim para o nosso exemplo existem as seguintes classes equivalentes de R que satisfazem esta condição: $\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_7\}, \{x_{11}, x_{12}\}$. A Figura 4.4 e a Figura 4.5 complementam o exemplo 4.1.

Aproveitando ainda o exemplo 4.1, pode-se mostrar as regiões positiva, negativa e de fronteira na Figura 4.6.

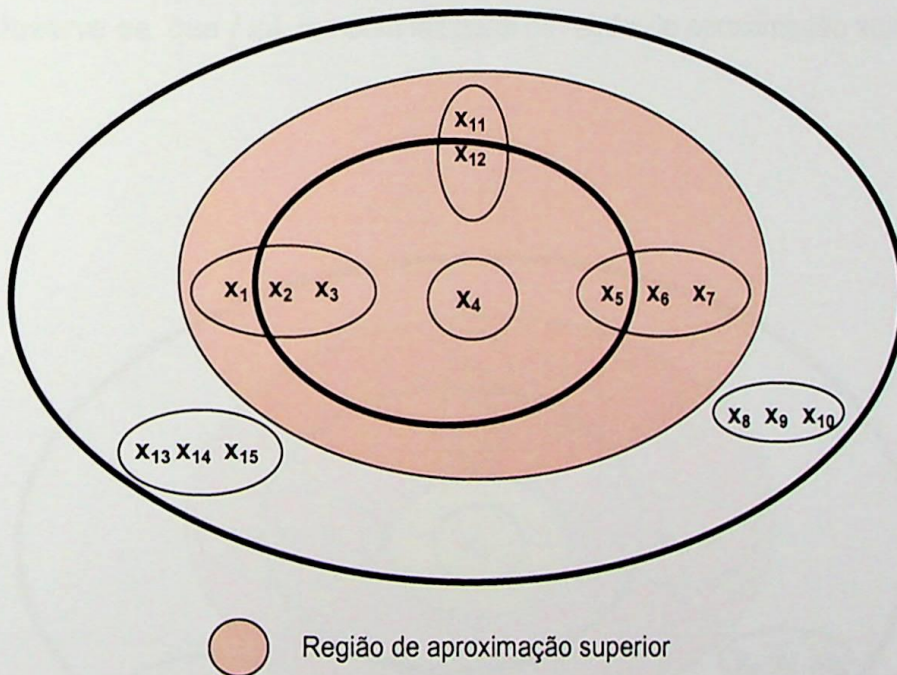


Figura 4.4 : Região de aproximação superior

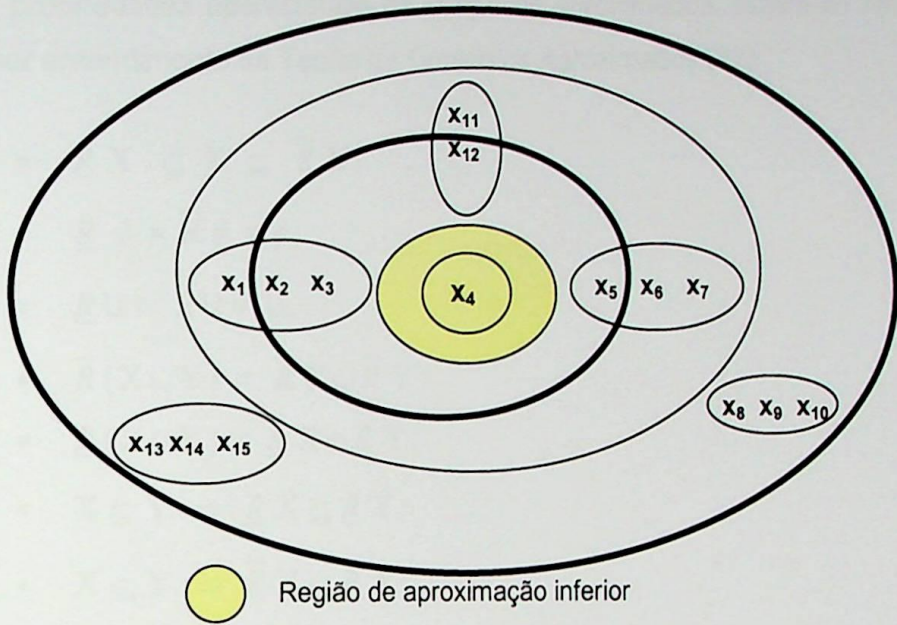


Figura 4.5 : Região de aproximação inferior

* Observe-se que $\{x_4\}$ também faz parte da região de aproximação superior.

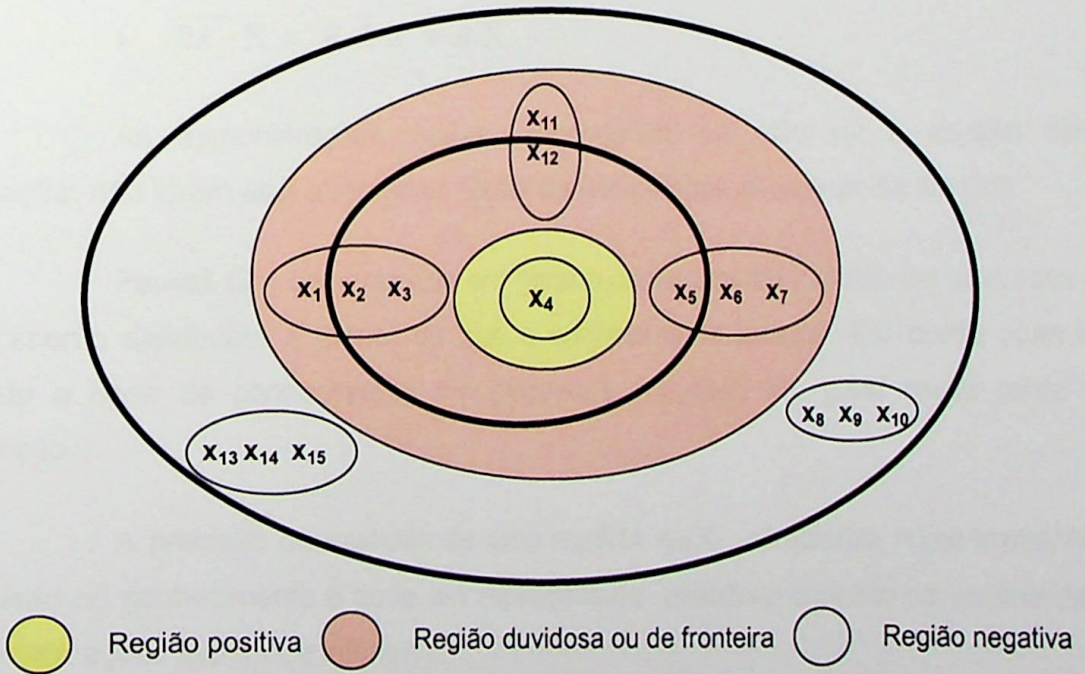


Figura 4.6: Regiões Positiva, Negativa e de Fronteira

4.2.3 PROPRIEDADES OPERACIONAIS DOS CONJUNTOS APROXIMADOS

As seguintes propriedades operacionais de conjuntos aproximados, fazem-se necessárias para um melhor entendimento da Teoria de Conjuntos Aproximados [21]:

- $\underline{R} X \subseteq X \subseteq \overline{R} X;$
- $\underline{R} \phi = \overline{R} \phi = \phi;$
- $\underline{R} U = \overline{R} U = U;$
- $\overline{R} (X \cup Y) = \overline{R} X \cup \overline{R} Y;$
- $\underline{R} (X \cap Y) = \underline{R} X \cap \underline{R} Y;$
- $X \subseteq Y \Rightarrow \underline{R} X \subseteq \underline{R} Y;$
- $X \subseteq Y \Rightarrow \overline{R} X \subseteq \overline{R} Y;$
- $\underline{R} (X \cup Y) \supseteq \underline{R} X \cup \underline{R} Y;$
- $\overline{R} (X \cap Y) \subseteq \overline{R} X \cap \overline{R} Y;$
- $\underline{R} (-X) = -\overline{R} X;$
- $\overline{R} (-X) = -\underline{R} X;$
- $\underline{R} \underline{R} X = \overline{R} \underline{R} X = \underline{R} X;$
- $\overline{R} \overline{R} X = \underline{R} \overline{R} X = \overline{R} X$

As demonstrações destas propriedades, por não ser o objetivo desta dissertação, não foram aqui abordadas. Estas demonstrações encontram-se em [21].

Pawlak [21] comenta que em geral o conhecimento incluído em uma base de conhecimento distribuído é menor do que o conhecimento integral. Em outras palavras, dividindo a base de conhecimento em pequenas unidades, em geral causa perda de informação.

A precisão ou exatidão de uma medida $\alpha_R(X)$ caracteriza numericamente a imprecisão do conhecimento e pode ser representado usando o conceito da cardinalidade das aproximações superior e inferior.

$$\alpha_R(X) = \frac{\text{card } \underline{RX}}{\text{card } \overline{RX}}$$

O índice de precisão ou exatidão pode variar entre 0 e 1; quando $\alpha_R(X)=1$ o conjunto é denominado de R-definível e portanto, a região duvidosa ou de fronteira, $BN_R(X)$, é vazia.

A qualidade da aproximação representa a porcentagem de objetos que podem ser corretamente classificados pelo atributo R e tem a seguinte expressão matemática:

$$\gamma_R(X) = \frac{\sum \text{card } \underline{RX}}{\text{card } U}$$

4.2.4 ATRIBUTOS DISPENSÁVEIS E ATRIBUTOS INDISPENSÁVEIS

Na Teoria dos Conjuntos Aproximados, os atributos de entrada de conhecimento em uma base de conhecimento podem ser divididos em duas classes ou tipos de atributos, os dispensáveis e os indispensáveis.

Os atributos dispensáveis, são aqueles que podem ser excluídos da base de conhecimento sem trazer prejuízo ao resultado final. Por sua vez, os atributos indispensáveis são aqueles que quando retirados da base de conhecimento fazem com que o resultado final seja alterado, isto é, passamos a não ter o conhecimento desejado.

Uchôa [18] comenta que a eliminação de atributos redundantes permite que se encontre um subconjunto minimal de atributos que possui o mesmo poder discriminatório que o conjunto original.

Análise de dependência é usada para determinar se um grupo de atributos (condições) pode caracterizar os valores de um outro atributo (decisão). A dependência entre as condições e decisão indica o quanto a decisão pode ser baseada nos valores dos atributos das condições. Em dados onde o atributo de decisão pode ser unicamente caracterizado em termos de condições, o grau de dependência é igual a um e a dependência é considerada totalmente funcional. O grau de dependência próximo de um,

por exemplo, que caracteriza uma situação onde a maioria das decisões pode ser determinada pelas condições, de maneira não ambígua, estabelece as bases para hipóteses que evidenciam relações significativas entre condições e decisão. A dependência próxima de zero sugere uma relação fraca ou mesmo não existente [22].

Uma questão comum em ciências que trabalham com conhecimento é se é possível ou não expressar um mesmo conceito com menos informação. No contexto de sistemas de representação de conhecimento, isso significa verificar se, dado um conjunto de descrições de objetos, é possível classificar esses objetos com um mínimo de atributos.

Grau de dependência é a relação de um conjunto de atributos de decisão sobre um conjunto de atributos de condição. O grau de dependência em um espaço aproximado $A=(U,C)$, é calculado da seguinte forma:

$$K(C,D) = \frac{|\text{pos}(C,D)|}{|U|}$$

4.2.5 CONCEITO DE CONJUNTO REDUÇÃO E NÚCLEO BÁSICO

A redução de atributos faz-se necessária quando existe uma quantidade de dados não moderada, uma grande amostra.

Muitas vezes a base de dados utilizada tem muitos campos, e apenas uma pequena quantidade é necessária para uma tomada de decisão, ou para expressar o conhecimento requerido. É muito importante a correta identificação dos dados relevantes. No caso de uma incorreção no decorrer do processo, os descartados podem se fazer necessários para o sucesso deste [16].

Os conceitos de *conjunto redução* ("reduct") e *núcleo básico* ("core") são muito importantes com relação as suas aplicações na redução de uma base de conhecimento.

Um problema crucial no contexto de sistemas de representação de conhecimento é o de encontrar subconjuntos do conjunto original de atributos com o mesmo poder discriminatório deste. Como comentado anteriormente, a obtenção destes subconjuntos pode auxiliar tanto na redução de custo computacional em tarefas que utilizem-se de sistemas de representação de conhecimento, como até mesmo custo

temporal ou financeiro (caso atributos de difícil obtenção ou alto custo possam ser eliminados) [18].

O objetivo da redução é encontrar um subconjunto de atributos com desempenho preditivo comparável ao conjunto original. Dado um conjunto de atributos, o número de subconjuntos a serem analisados é finito e o procedimento que procura encontrar a solução ótima é feito sempre com base no conjunto original. Os resultados são avaliados e o subconjunto de atributos com o melhor desempenho é selecionado [16].

Matematicamente, pode-se definir os conjuntos redução e núcleo básico, utilizando uma família de relações equivalentes R . O conjunto redução de R , $RED(R)$, é definido como um conjunto reduzido de atributos que conserva a mesma classificação indutiva da família R . O conjunto básico de R , $CORE(R)$, é aquele que aparece em todos os conjuntos redução de R , isto é, o conjunto de elementos indispensáveis para caracterizar a relação R [23].

No contexto da Teoria dos Conjuntos Aproximados, a obtenção de redutos está intimamente ligada à análise de dependência entre atributos. Para isso, as propriedades referentes à dependência e independência de atributos em um sistema de representação de conhecimento $S = (U, Q, V, \rho)$, habilitam verificar se um conjunto de atributos $P \subseteq Q$ é independente ou não. Para tanto é suficiente verificar, para todo atributo de P , se a remoção desse um atributo aumenta ou não o número de conjuntos elementares no sistema. Se o conjunto de atributos é dependente, é interessante encontrar os subconjuntos minimais de atributos, com o mesmo poder representacional que o conjunto original [18].

Em outras palavras, o conjunto redução é a estrutura mínima de representação do conhecimento existente em uma base. Ela pode não ser única, pois diversos conjuntos "redução" podem ser conseguidos em uma base de conhecimento, dependendo dos atributos utilizados para a sua representação. Esses atributos correspondem aos parâmetros analisados no sistema monitorado e aos quais são associados os respectivos valores das medições efetuadas, que se constituirá na base de dados mencionada. Rossi [24].

O núcleo básico é composto pelos elementos necessários para compor qualquer conjunto redução, ou seja, em outras palavras é a interseção desses conjuntos.

4.2.6 ALGORITMO PROPOSTO

Existem diversos algoritmos propostos em publicações [25]. Neste trabalho é utilizado o algoritmo proposto em [26], sendo transcrito o algoritmo conforme publicado.

O algoritmo utiliza um exemplo que tem como proposta ajudar o entendimento dos conceitos fundamentais da Teoria de Conjuntos Aproximados. A idéia é transformar um conjunto de exemplos em um conjunto de regras que representem o conhecimento inicial contido na tabela de conhecimento da NBR7274 [12]. Algumas simplificações são feitas para facilitar o melhor entendimento de cada passo da formulação sem perda da generalização.

O algoritmo está centrado em dois conceitos fundamentais da Teoria de Conjuntos Aproximados, redução do conhecimento (*reduct*) e núcleo base (*core*), conceitos estes já descritos neste capítulo.

O principal objetivo da redução da base de conhecimento é a simplificação para um conjunto de exemplos que representem todo o conhecimento contido na base de conhecimento X . Isto pode ser obtido pelo seguinte procedimento:

- Calcular o núcleo base do problema;
- Eliminar ou substituir uma variável por outra variável;
- Redefinir o problema utilizando novas categorias básicas.

O algoritmo para redução da tabela de decisão pode ser formulado através de desenvolvimentos algébricos ou por relações lógicas.

O algoritmo proposto em [26], pode ser representado segundo os seguintes passos:

- 1: Transformar valores contínuos em faixas.
- 2: Eliminar atributos idênticos.
- 3: Eliminar exemplos idênticos.
- 4: Eliminar atributos dispensáveis.
- 5: Calcular o conjunto básico da tabela de decisão.
- 6: Compor a tabela conjunto redução.
- 7: Agrupar os exemplos.
- 8: Compor o conjunto final de regras.

Exemplo 4.2: Este exemplo tem a finalidade de esclarecer a utilização do algoritmo proposto, onde os passos mencionados acima do algoritmo são descritos e aplicados no transcorrer do exemplo. O exemplo parte da tabela inicial, Tabela 4.1, tabela de conhecimento elaborada na norma NBR 7274.

Estas relações, quando aplicadas em sua forma original, forneciam 16 possibilidades de valores de entrada sem valores de saída, representando uma falha no conhecimento dos problemas a que as regras se propunham a abordar.

Após a aplicação do algoritmo proposto em [26] ao conjunto de dados iniciais, verificou-se a inexistência de combinações de dados de entrada sem valores de saídas.

Para facilitar a forma de apresentação das tabelas, o descritivo referente às saídas foram substituídos por letras maiúsculas.

Tabela 4.1 : Conjunto de conhecimento inicial

U	Atributos			S
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	
1	0	0	0	A
2	0	1	0	B
3	1	1	0	C
4	1	0	1	D
5	2	0	1	D
6	2	0	2	D
7	1	0	2	E
8	0	0	1	F
9	0	2	0	G
10	0	2	1	H
11	0	2	2	I

Passo 1: O primeiro passo do algoritmo é a redefinição dos valores de cada atributo de acordo com certa métrica. Neste exemplo não se aplica este passo, pois a tabela de conhecimento inicial já é a representação de intervalos de valores.

Passo 2: Nesta etapa são eliminados os exemplos repetidos. Verificamos que neste exemplo, Tabela 4.1, não existem exemplos repetidos, portanto não haverá redução da tabela de decisão com este passo.

Passo 3: Nesta etapa são eliminados os exemplos idênticos. Entende-se por exemplos idênticos aqueles que tenham os valores dos atributos A, B, C, D e a decisão S idênticos.

Após verificação da tabela inicial, Tabela 4.1, verifica-se que não existem exemplos idênticos.

Passo 4: Neste passo são verificados os atributos indispensáveis na tabela de decisão. Este objetivo pode ser alcançado eliminando passo a passo cada atributo e verificando se na ausência de determinado atributo a tabela de decisão ainda mantém a correta classificação.

É mostrado na Tabela 4.2 que eliminando o atributo C_2H_2/C_2H_4 , os exemplos 2 e 3 tem valores idênticos, porém com valores de saída distintos. Isto caracteriza a necessidade do atributo retirado para que se mantenha a consistência do conjunto de dados.

Tabela 4.2 : Eliminação do atributo C_2H_2/C_2H_4

U	Atributos			S
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
1		0	0	A
2		1	0	B
3		1	0	C
4		0	1	D
5		0	1	D
6		0	2	D
7		0	2	E
8		0	1	F
9		2	0	G
10		2	1	H
11		2	2	I

É mostrado na Tabela 4.3 que eliminando o atributo CH_4/H_2 os exemplos 1 e 2 tem valores idênticos porém valores de saída distintos, caracterizando a necessidade do atributo retirado para que se mantenha a consistência do conjunto de dados.

É mostrado na Tabela 4.4 que eliminando o atributo C_2H_4/C_2H_6 os exemplos 5 e 6 tem valores idênticos porém valores de saída distintos, caracterizando a necessidade do atributo retirado para que mantenhamos a consistência do conjunto de dados.

Tabela 4.3 : Eliminação do atributo CH_4/H_2

U	Atributos			S
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
1	0		0	A
2	0		0	B
3	1		0	C
4	1		1	D
5	2		1	D
6	2		2	D
7	1		2	E
8	0		1	F
9	0		0	G
10	0		1	H
11	0		2	I

Tabela 4.4 : Eliminação do atributo C_2H_4/C_2H_6

U	Atributos			S
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
1	0	0		A
2	0	1		B
3	1	1		C
4	1	0		D
5	2	0		D
6	2	0		D
7	1	0		E
8	0	0		F
9	0	2		G
10	0	2		H
11	0	2		I

Tendo verificado a possibilidade de eliminação de cada atributo da tabela de conhecimento e constatado a inviabilidade de eliminação de qualquer destes, a tabela inicial segue sendo válida.

Passo 5: Neste passo é computado o núcleo básico (*core*) dos exemplos. Isto pode ser feito eliminando cada atributo passo a passo, e verificando se a tabela de decisão continua emitindo a resposta correta (continua sendo consistente), isto é, para mesmos valores em determinados exemplos temos valores de saída distintos. Se a eliminação é possível este elemento da tabela não é *core* e pode ser eliminado.

Para melhor explicar este passo são mostradas as Tabela 4.5 e 4.6, sendo na primeira mostrada a eliminação de um elemento, e na tabela seguinte, a tabela resultante após a conclusão deste **passo**.

Tabela 4.5 : Eliminado um elemento do conjunto de conhecimento inicial

U	Atributos			S
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
1	0	0	0	A
2	0	1	0	B
3	1	1	0	C
4	1	0	1	D
5	2	0	1	D
6	2	0	2	D
7	1	0	2	E
8	0	0	1	F
9	0	2	0	G
10	0	2	1	H
11	0	2	2	I

O elemento do atributo C_2H_2/C_2H_4 , exemplo 3, não pode ser eliminado, pois geraria uma inconsistência entre os exemplos 2 e 3, pois ambos ficariam com a combinação $\{-, 1, 0\}$ tendo saídas distintas. Portanto, este elemento é core e não pode ser eliminado.

Tabela 4.6 : Core do exemplo

U	Atributos			S
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
1		0	0	A
2	0	1		B
3	1			C
4	1		1	D
5	2			D
6	2			D
7	1		2	E
8	0	0	1	F
9		2	0	G
10		2	1	H
11			2	I

Passo 6: Neste passo é calculado o conjunto de redução do conhecimento (*reduct*) que conserva a mesma classificação indutiva do conjunto original de exemplos. A Tabela 4.7 mostra o conjunto reduzido encontrado.

Tabela 4.7 : Conjunto reduzido do exemplo

U	Atributos			S
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
1		0	0	A
2	0	1		B
3	1	1		C
4	1		0	C
5	1		1	D
6	2			D
7	1		2	E
8	0	0	1	F
9		2	0	G
10		2	1	H
11		2	2	I
12	0		2	I

Passo 7: De acordo com a Tabela 4.7, o conhecimento existente na Tabela 4.1 pode ser expressado pelo seguinte conjunto de regras:

- Se CH_4/H_2 é igual a 0 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 0, então a saída é A;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 0 e CH_4/H_2 é igual a 1, então a saída é B;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 1 e CH_4/H_2 é igual a 1, então a saída é C;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 1 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 0, então a saída é C;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 1 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 1, então a saída é D;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 2, então a saída é D;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 1 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 2, então a saída é E;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 0 e CH_4/H_2 é igual a 0 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 1, então a saída é F;
- Se CH_4/H_2 é igual a 2 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 0, então a saída é G;
- Se CH_4/H_2 é igual a 2 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 1, então a saída é H;
- Se CH_4/H_2 é igual a 2 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 2, então a saída é I;
- Se C_2H_2/C_2H_4 é igual a 0 e C_2H_4/C_2H_6 é igual a 2, então a saída é I;

4.3 Sistemas Difusos

4.3.1 INTRODUÇÃO

O conceito de conjuntos difusos (ou conjuntos nebulosos, em inglês "fuzzy sets") foi apresentado pela primeira vez, em 1965, por Lotfi A. Zadeh [27]. No início da década de 60, Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana.

Procurando solucionar esses problemas o Prof. Zadeh publicou em 1965 [27] um artigo resumindo os conceitos dos Conjuntos Difusos, onde apresentava as bases dessa nova teoria que mais tarde revolucionaria as técnicas de controle de sistemas.

A ideia clássica de conjunto obedece a uma lógica binária, ou seja, um elemento pertence ou não pertence a um conjunto, não existindo, desta maneira, outras opções intermediárias [28].

Uma eleição é um exemplo simples onde a lógica binária não é adequada para representar a realidade. Neste caso, caracterizando uma lógica quartenária, cada eleitor pode escolher, por exemplo, uma das seguintes opções: a favor, ser contra, votar em branco ou anular seu voto.

A característica dos conjuntos difusos é que a fronteira entre pertencer e não pertencer a ele não é bem definida, sugerindo assim, a ideia de graus de pertinência.

4.3.2 LÓGICA DIFUSA

Lógica Difusa é um modo de utilizar dados de processos inerentemente analógicos que deslocam-se através de uma faixa contínua em um computador digital que trabalha com dados numéricos bem definidos, ou seja, valores discretos.

Normalmente, tem-se num conjunto convencional limites bruscos, onde a transição dos membros para não-membros é abrupta e repentina. O grau de associação do conjunto é especificado, por exemplo, por um nível '1' para os membros e '0' para os não-membros. Por exemplo, o controle de temperatura de um transformador para o comando do sistema de refrigeração pode considerar 59 °C como uma temperatura baixa e 90 °C como uma temperatura elevada.

Num conjunto difuso, diferentemente, as transições entre o membro e o não-membro estão numa faixa gradual, sendo associado um grau ao elemento entre '0' (totalmente não membro) e '1' (totalmente membro). Naquele controlador de tensão, 60 °C pode ser 'moderado' e um 'pouco baixa' ao mesmo tempo, 80 °C é 'muito alta' e assim por diante.

Dessa forma, torna-se desnecessária a precisão. Por exemplo, sob o ponto de vista de desempenho e segurança, é indiferente se a velocidade de um carro estiver a 75 km/h ou a 76 km/h.

De outra forma, ao estabelecer o seguinte padrão:

- A temperatura do transformador de 60 °C ou menos, não é considerada elevada.
- A temperatura do transformador de 80 °C ou mais, é considerada elevada.

E, em seguida, se fizermos a seguinte pergunta: a temperatura do transformador está elevada?

A resposta deve ser: se a temperatura estiver em de 60°C ou menos, a temperatura não é elevada, já que o valor do grau de pertinência da resposta é 0 (zero), ou seja, não-pertinência. Mas se a temperatura do transformador for de 90°C ou mais, a mesma é elevada, já que o grau de certeza é 1, ou seja, pertinência.

Mas se a temperatura do transformador for entre 61 e 79 °C ela não pode ser considerada nem elevada nem baixa (não elevada). No entanto, pode ser estabelecido um grau de pertinência quanto a ser elevada. Como os valores 0 e 1 representam as percentagens 0% e 100%, é possível estabelecer o grau de pertinência em termos

percentuais. Por exemplo: se a temperatura estiver a 65 °C, por uma regra de três simples, pode-se afirmar que a temperatura é elevada com um grau de certeza de 25% (ou 0,25).

A Figura 4.7 representa o comentado acima.

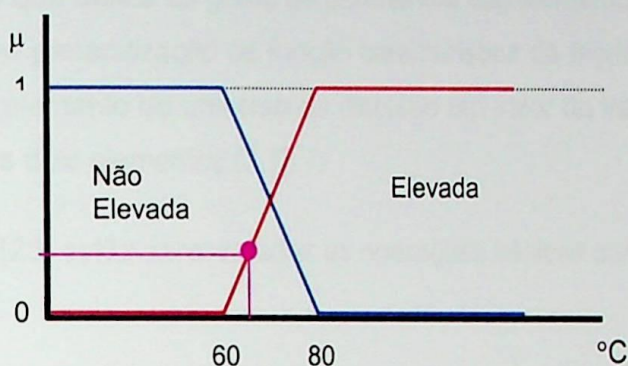


Figura 4.7 : Representação Fuzzy

Na teoria clássica dos conjuntos, um determinado elemento pertence ou não a um conjunto específico. Seja U uma coleção de objetos, chamado universo de discurso, u um elemento particular deste universo e A um dado conjunto contido em U , então, ou ' u pertence a A ' ou ' u não pertence a A '. Para cada elemento do universo de discurso pode-se, portanto, determinar sem ambigüidades quando pertence ou não a um conjunto.

Pode-se descrever um conjunto pela enumeração de todos os seus componentes, através de uma propriedade que deve ser satisfeita por seus membros, ou ainda, através de uma função $\mu(u)$ chamada função característica, que associa um valor para todo u pertencente a U tal que:

$$\mu_C(x) = \begin{cases} = 1 & \text{Se } u \in U \\ = 0 & \text{Se } u \notin U \end{cases}$$

Onde $\mu_C(x) : C \rightarrow 0$ ou 1 e C é qualquer conjunto no qual x está definido.

A extensão sugerida por Zadeh esta na possibilidade de um determinado elemento poder pertencer a um conjunto com um valor chamado *grau de pertinência*. Assim, um elemento não simplesmente pertence ou não pertence a um conjunto, como na teoria clássica, mas poderá pertencer a um conjunto com grau de pertinência que pode assumir

valor em uma dada estrutura do tipo lattice [29]. A maioria dos trabalhos adota por simplicidade e para fazer uma analogia com o mundo real o intervalo $[0,1]$, onde o valor 0 indica uma completa exclusão, o valor 1 representa completa pertinência e os valores deste intervalo representam graus intermediários de pertinência do objeto com relação ao conjunto. A função que define os graus de pertinência dos elementos é chamada função de pertinência e é uma generalização da função característica da teoria clássica, uma vez que associa para todo elemento do universo de discurso um valor do intervalo $[0,1]$ ao invés do conjunto de apenas dois elementos $\{0,1\}$.

Em [28] estão apresentadas as operações básicas com conjuntos difusos.

4.3.3 CONTROLADOR DIFUSO

O controlador difuso está dividido em três estágios, o estágio de entrada, o estágio de processamento e o estágio de saída.

As variáveis de entrada em um sistema de controle difuso são em geral mapeadas dentro de conjuntos de funções consecutivas - o processo de conversão de um valor de entrada intermediário em um valor difuso é chamado de "fuzzificação".

A forma mais comum de funções consecutivas (funções de pertinência) é a triangular, conforme Figura 4.7, embora o mais importante é o número de funções e não a forma.

O estágio de processamento é baseado em uma coleção de regras lógicas na forma de declaração *SE* __ *ENTÃO* ____, onde o *SE* é chamado de antecedente e o *ENTÃO* de consequência.

As declarações *E*, *OU* e *NÃO* são operadores difusos, com as seguintes definições dentro do estágio de processamento: *E* usa o peso mínimo para todos os antecedentes, *OU* usa os valores máximos e *NÃO* subtrai uma função consecutiva de 1 dando a função complementar.

O estágio de saída consiste em defuzzificar as regras geradas durante o processamento, que é a transformação inversa do domínio difuso para o domínio do mundo real, para que ocorra o acoplamento entre a saída do algoritmo difuso e as variáveis de atuação.

Existem diversas funções de defuzzificação, para a aplicação proposta utilizou-se a função descrita no item seguinte.

4.3.4 APLICAÇÃO

O projeto de sistemas de controle difuso é baseado em métodos empíricos. Adotou-se a seqüência proposta mostrada a seguir:

- Definição das variáveis do sistema;
- Definição dos conjuntos difusos;
- Aplicação da função de defuzzificação, método a ser utilizado
- Apresentação da saída do sistema

Como definido em 3.4, proposta de solução, o tratamento dos dados, diagnósticos, propostos pela norma NBR7274 e Rogers, visto que após a aplicação dos conceitos da Teoria dos Conjuntos Aproximados a estas tabelas de conhecimento, NBR7274 e Rogers, em determinadas situações, combinações de resultados possíveis, existe a possibilidade de obtermos mais de um diagnóstico para a mesma entrada de valores.

Aqui demonstra-se a utilização dos conceitos de Conjuntos Difusos utilizando dados obtidos da Tabela 4.2 que mostra os resultados obtidos após aplicação dos conceito da Teoria dos Conjuntos Aproximados, onde em alguns casos são obtidos dois diagnósticos possíveis. Na Tabela 4.8 é representado o exemplo número 06 da Tabela 5.3.

Tabela 4.8: NBR 7274 após TCA exemplo 06.

	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	Diagnóstico após aplicação da TCA
6	0	1	2	Falha térmica muito alta (>700C)
				DP baixa energia

- **Passo 1:** Definição das variáveis do sistema.

As variáveis do sistema são os valores de entrada obtidos na análise cromatográfica dos gases dissolvidos envolvidos no critério de gás-chave, Tabela 4.9, as

relações propostas pelo critério de gás-chave, Gráficos 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, e 3.7, e os diagnósticos propostos pela norma NBR7274, ver Tabela 3.6.

Tabela 4.9: Entrada de gases para Conjuntos Difusos

Gases	
CO	Monóxido De Carbono
H ₂	Hidrogênio
CH ₄	Metano
C ₂ H ₄	Etileno
C ₂ H ₆	Etano
C ₂ H ₂	Acetileno

- **Passo 2:** Definição dos conjuntos difusos

Nesta etapa são definidos os conjuntos difusos a serem utilizados no sistema, baseados no critério de gás-chave:

O critério de gás-chave propõe a partir das entradas mostradas na Tabela 4.9, cinco diagnósticos possíveis. Os valores de entrada estão expressos em percentual da concentração de cada gás na amostra considerada, onde o somatório dos percentuais perfaz o total de 100%. Observe o Gráfico 3.4 onde o diagnóstico proposto é *Descargas Parciais* e a concentração percentual entre os gases analisados é a seguinte: CO (0,2%), H₂(86%), CH₄(13%), C₂H₆(0,5%), C₂H₄(0,2%) e C₂H₂(0,1%).

Para facilitar o entendimento, é feita uma representação dos diagnósticos propostos pelo critério de gás chave conforme a Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Representação de diagnósticos do critério de gás-chave

Diagnóstico	Representação
Arco no óleo	D1
Descargas Parciais	D2
Óleo superaquecido	D3
Celulose Superaquecida	D4
Eletrólise	D5

Para determinado gás de entrada é verificado seu conjunto difuso para cada diagnóstico proposto, com dispersão de 40%, conforme demonstrado nos Gráficos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, e 4.6.

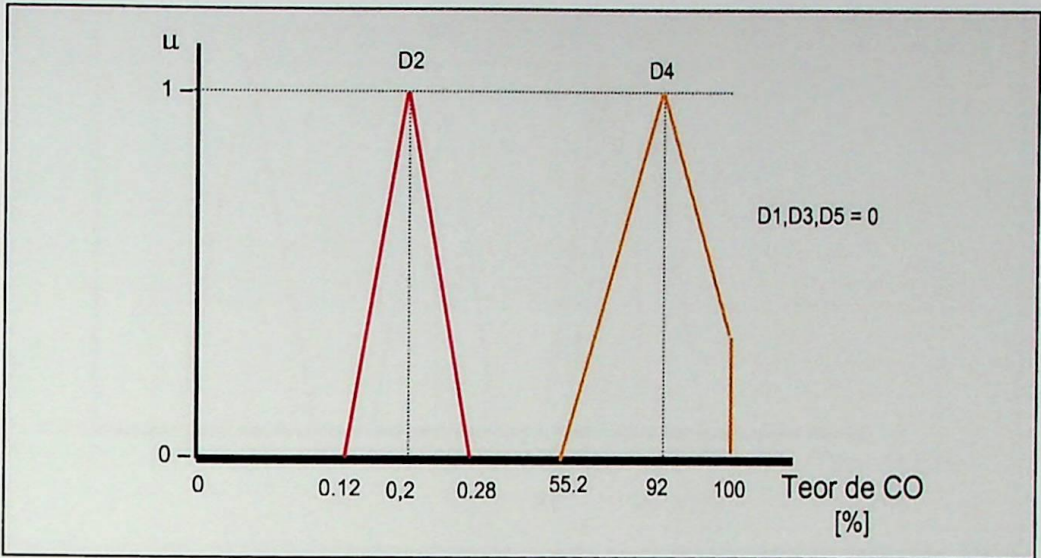
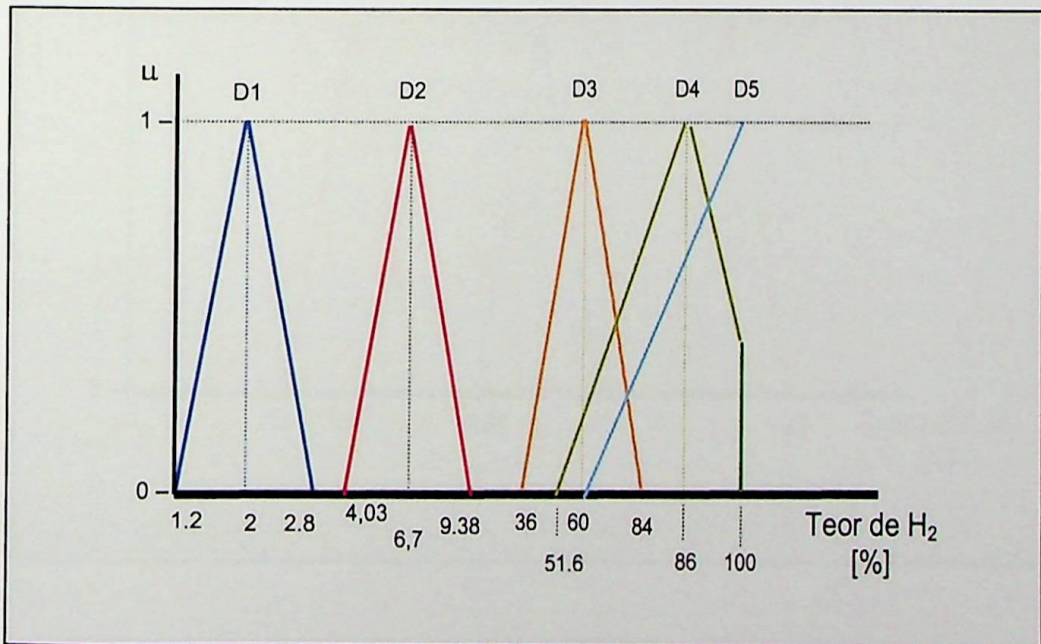
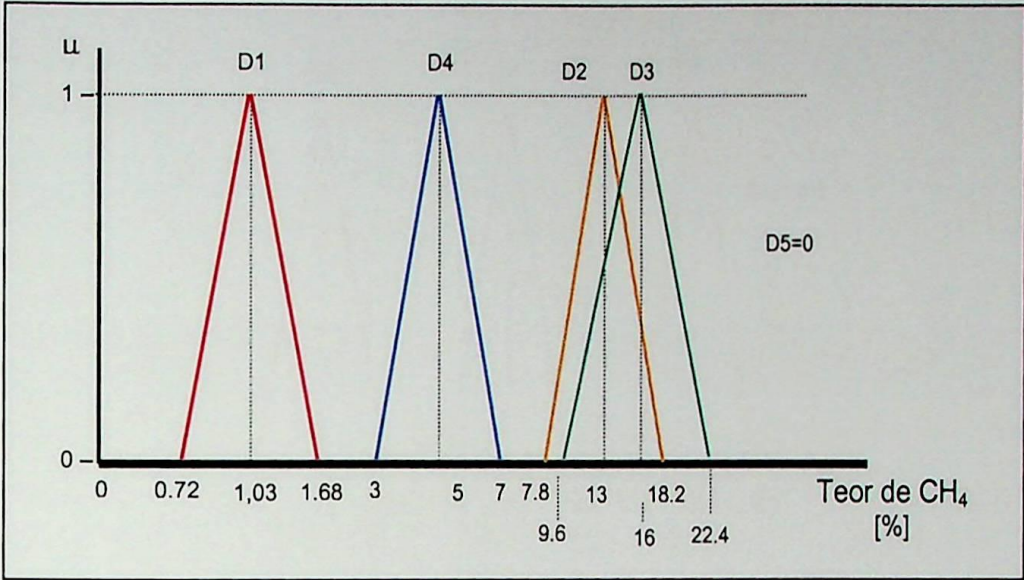
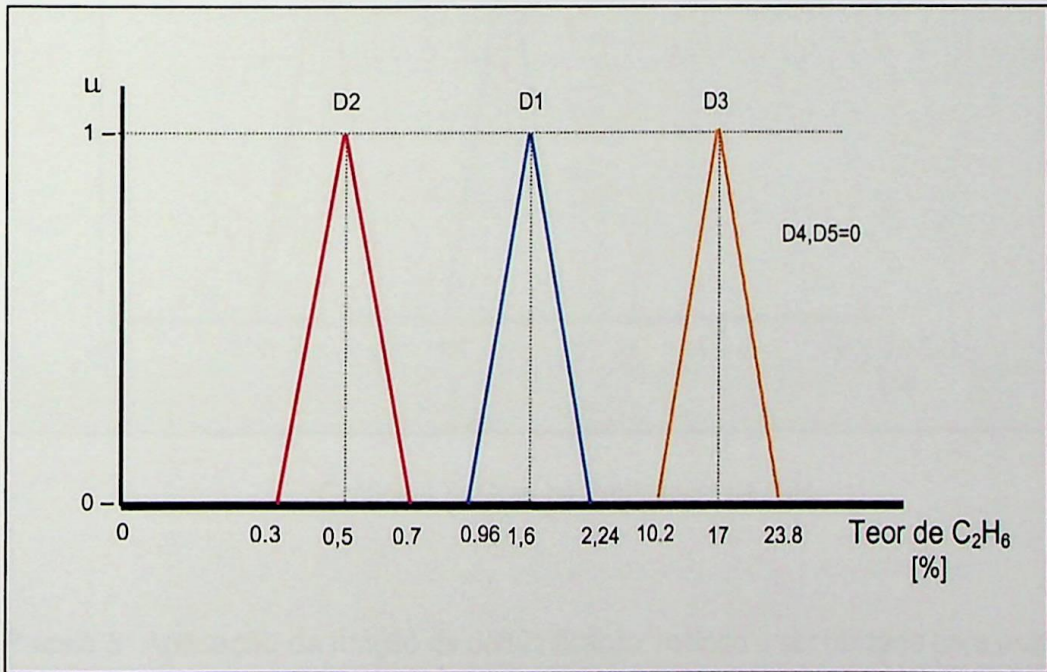
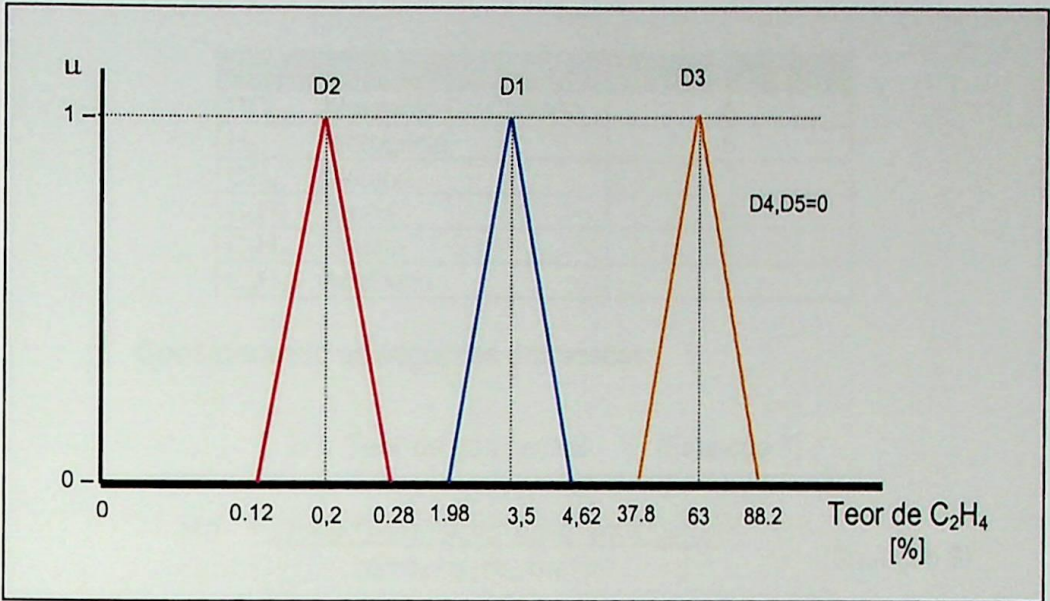
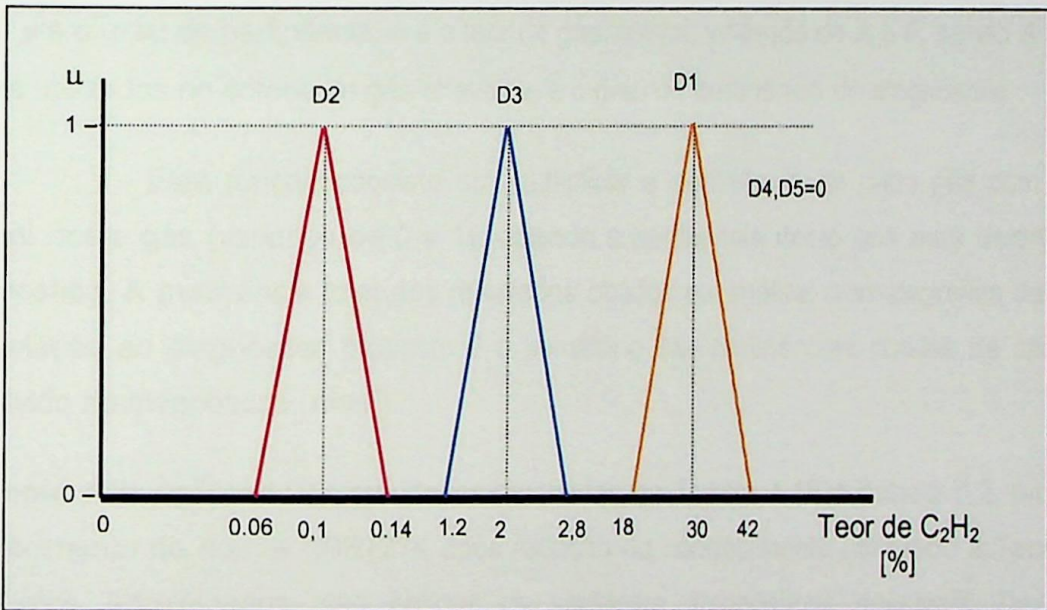


Gráfico 4.1: Grau de Pertinência de CO

Gráfico 4.2: Grau de Pertinência de H₂

Gráfico 4.3: Grau de Pertinência de CH_4 Gráfico 4.4: Grau de Pertinência de C_2H_6

Gráfico 4.5: Grau de Pertinência de C_2H_4 Gráfico 4.6: Grau de Pertinência de C_2H_2

- **Passo 3:** Aplicação da função de defuzzificação, método a ser utilizado para extração de regras.

Para melhor representar a função adotada faz-se necessário representar os gases utilizados pelo critério de gás-chave conforme apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Representação dos gases do critério de gás-chave

Gás		Representação
CO	Monóxido De Carbono	A
H ₂	Hidrogênio	B
CH ₄	Metano	C
C ₂ H ₆	Etano	D
C ₂ H ₄	Etileno	E
C ₂ H ₂	Acetileno	F

Considerando as seguintes expressões:

$$\sigma = \text{Teor de gás central} \quad (\text{Equação 7})$$

$$\mu_D = \frac{\mu_A\sigma_A + \mu_B\sigma_B + \mu_C\sigma_C + \mu_D\sigma_D + \mu_E\sigma_E + \mu_F\sigma_F}{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C + \sigma_D + \sigma_E + \sigma_F} \quad (\text{Equação 8})$$

onde μ é o grau de pertinência, σ é o teor de gás central, variando de A a F, sendo A e F os gases utilizados no critério de gás chave, μ_D é o grau de pertinência do diagnóstico.

Esta função consiste em multiplicar a pertinência de cada gás com o teor central deste gás (variando de 0 a 1), obtendo a pertinência deste gás para determinado diagnóstico. A pertinência total dos resultados obtidos na análise cromatográfica de gases em relação ao diagnóstico proposto é o somatório das pertinências obtidas de cada gás envolvido no diagnóstico ($A \Rightarrow F$).

Exemplo 4.3: Aplicando os resultados mostrados na Tabela 4.13 à Tabela 5.2, tabela de conhecimento da norma NBR7274 após redução do conhecimento utilizando a Teoria dos Conjuntos Aproximados, são obtidos os seguintes diagnósticos possíveis: *Descargas Parciais baixa energia* e *Falha Térmica muito alta (>700°C)*.

Aplicando os conceitos de Conjuntos Difusos aqui mencionados, tendo como entrada os valores obtidos na Tabela 5.3, e as funções resumidas nas equações 7 e 8, observa-se a aplicação dos conceitos conforme segue:

Inicialmente calcula-se o percentual de cada gás-chave desta análise em relação ao total destes gases encontrados. Os valores encontrados são os seguintes: CO (31,85%), H₂(63,06%), CH₄(2,54%), C₂H₆(0,64%), C₂H₄(1,91%), e C₂H₂(0%).

Verificando o conjunto difuso para cada diagnóstico proposto, com dispersão de 40%, são obtidas os seguintes graus de pertinência para cada concentração de gás na análise.

Na Tabela 4.12 são mostrados os valores calculados para as pertinências de cada gás em relação aos valores obtidos na análise, os valores centrais σ e a pertinência de cada diagnóstico, μ_D .

Tabela 4.12: Graus de pertinência para o exemplo

		Diagnósticos				
Gases		D1	D2	D3	D4	D5
A	μ	0	0	0	0	0
	σ	0	0,2	0	92	0
	$\mu.\sigma$	0	0	0	0	0
B	μ	0,8	0	0	0	0
	σ	60	86	2	6,7	100
	$\mu.\sigma$	48	0	0	0	0
C	μ	0	0	0	0	0
	σ	5	13	16	1,2	0
	$\mu.\sigma$	0	0	0	0	0
D	μ	0	0,07	0	0	0
	σ	1,6	0,5	17	0	0
	$\mu.\sigma$	0	0,035	0	0	0
E	μ	0	0	0	0	0
	σ	3,5	0,2	63	0	0
	$\mu.\sigma$	0	0	0	0	0
F	μ	0	0	0	0	0
	σ	30	0,1	2	0	0
	$\mu.\sigma$	0	0	0	0	0
$\Sigma\mu.\sigma$		48	0,035	0	0	0
$\Sigma\sigma$		100	100	100	100	100
$\mu_D = \Sigma\mu.\sigma / \Sigma\sigma$		0,48	0,0004	0	0	0

Na Tabela 4.12 observa-se as seguintes pertinências em relação aos diagnósticos propostos pelo critério de gás-chave:

- D1 => Arco no óleo, pertinência de 0,48
- D2 => Descargas Parciais, pertinência de 0,0004

Utilizando o conjunto de regras extraídas da ferramenta computacional tem-se:

Se D1 maior que D2 ou D3 maior que D2 ou D4 maior que D2 então saída igual a *Falha Térmica muito alta (>700°C)*

Tabela 4.13: Resultados obtidos na análise cromatográfica

Equipamento: Transformador Principal TU17 fase A		Data: 19/01/1991
Número de Série: 100296/2		Folha de Medição: 00061/1991
Gases	Ppm	
Monóxido De Carbono – CO	50	
Hidrogênio – H ₂	99	
Metano - CH ₄	4	
Etileno – C ₂ H ₄	3	
Etano - C ₂ H ₆	1	
Acetileno - C ₂ H ₂	0	
Total de gases combustíveis	157	
Dióxido De Carbono – CO ₂	7600	
Nitrogênio – N ₂	34100	
Oxigênio - O ₂	140	
Hexafluoreto de Enxofre – SF ₆	0	
Total de Gases	41997	

Aplicando as Técnicas de IA às Normas ou Critérios

5.1 Introdução

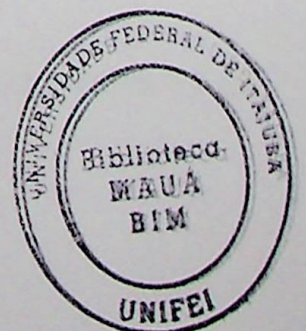
Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos com a aplicação de conceitos de Conjuntos Aproximados às tabelas de relações de gases propostas por normas ou critérios que contenham falhas na base de conhecimento do sistema quanto a ausência de diagnóstico proposto.

São mostradas as tabelas em sua forma original, com as relações possíveis e as mesmas tabelas após sofrerem tratamento das informações utilizando a Teoria dos Conjuntos Aproximados, com as conclusões cabíveis a cada caso.

Conforme mencionado no Capítulo 3, as normas ou critérios que mostraram deficiência quanto a emissão de diagnóstico para a totalidade dos dados disponíveis para teste, 7822 resultados, foram:

- NBR 7274 , com 11,587% de casos com diagnóstico desconhecido;
- Rogers, com 32,639% de casos com diagnóstico desconhecido;
- Dörnemburg, com 89,5951% de casos com diagnóstico desconhecido;

Segundo Binda [11], o método proposto por Dörnemburg é baseado em diagnósticos genéricos para identificação de três tipos de falhas: pontos quentes, descargas elétricas (exceto descargas internas) e descargas Internas (são descargas parciais que ocorrem em bolhas de ar). Por tratar-se de um método que sugere diagnósticos genéricos, ele não pode ser utilizado sem que sejam utilizados outros métodos como apoio a decisão. Portanto, este método de análise dos gases obtidos na cromatografia gasosa não terá suas relações expandidas com a utilização de Conjuntos Aproximados.



5.2 A metodologia proposta aplicada à NBR 7274

As tabelas originalmente propostas pela norma estão descritas no Capítulo 4, Tabela 4.6 e Tabela 4.7.

A Tabela 5.1 mostra todas as combinações possíveis de entrada de dados, totalizando 27 entradas possíveis, e mostra o diagnóstico obtido por cada combinação utilizando as relações originalmente propostas pela NBR 7274.

Tabela 5.1 : Variáveis possíveis conforme NBR 7274

	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	Diagnóstico
1	0	0	0	Sem Falha
2	0	0	1	Falha Térmica baixa (<150°C)
3	0	0	2	Sem diagnóstico proposto
4	0	1	0	Descargas Parciais baixa energia
5	0	1	1	Sem diagnóstico proposto
6	0	1	2	Sem diagnóstico proposto
7	0	2	0	Falha Térmica média (150-300°C)
8	0	2	1	Falha Térmica alta (300-700°C)
9	0	2	2	Falha Térmica muito alta (>700°C)
10	1	0	0	Sem diagnóstico proposto
11	1	0	1	Descargas de baixa energia
12	1	0	2	Descargas de alta energia
13	1	1	0	Descargas Parciais alta energia
14	1	1	1	Sem diagnóstico proposto
15	1	1	2	Sem diagnóstico proposto
16	1	2	0	Sem diagnóstico proposto
17	1	2	1	Sem diagnóstico proposto
18	1	2	2	Sem diagnóstico proposto
19	2	0	0	Sem diagnóstico proposto
20	2	0	1	Descargas de baixa energia
21	2	0	2	Descargas de baixa energia
22	2	1	0	Sem diagnóstico proposto
23	2	1	1	Sem diagnóstico proposto
24	2	1	2	Sem diagnóstico proposto
25	2	2	0	Sem diagnóstico proposto
26	2	2	1	Sem diagnóstico proposto
27	2	2	2	Sem diagnóstico proposto

Observa-se na Tabela 5.1 que das 27 combinações possíveis de resultados, 16 não apresentam diagnóstico proposto.

Após se aplicar a metodologia proposta à norma obtém-se a Tabela 5.2 com as novas relações de entradas.

Tabela 5.2 : Relações da NBR 7274 após TCA

Diagnóstico	Relações		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Sem falha		0	0
Descargas Parciais baixa energia	0	1	
Descargas Parciais alta energia	1	1	
Descargas Parciais alta energia	1		0
Descargas de energia reduzida	1		1
Descargas de energia reduzida	2		
Descargas de alta energia	1		2
Falha térmica baixa (<150 °C)	0	0	1
Falha térmica média (150 – 300°C)		2	0
Falha Térmica alta (300 – 700°C)		2	1
Falha Térmica muito alta (>700°C)		2	2
Falha Térmica muito alta (>700°C)	0		2

A Tabela 5.3 mostra todas as combinações possíveis de entrada de dados, totalizando 27 entradas possíveis, e mostra o diagnóstico obtido por cada combinação utilizando as relações propostas pela NBR 7274 após TCA.

Observa-se na Tabela 5.3 que das 27 combinações possíveis de resultados, todas apresentam diagnóstico proposto, nenhum diagnóstico proposto é divergente da tabela original e são apresentadas 11 possibilidades de duplo diagnóstico.

Aplicando a nova tabela da NBR 7274, após aplicação da TCA, Tabela 5.3, à totalidade dos dados disponíveis para teste, 7822 resultados de ensaios, observa-se que: Dos 7822 resultados de ensaios testados, 100% dos casos possíveis obtiveram diagnóstico conhecido. 6766 (86,585%) apresentaram somente um diagnóstico e 1056 (13,415%) apresentaram dois diagnósticos.

Tabela 5.3 : Variáveis possíveis conforme NBR 7274 após TCA.

	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	Diagnóstico após aplicação da TCA
1	0	0	0	Sem Falha
2	0	0	1	Falha térmica baixa (<150C)
3	0	0	2	Falha térmica muito alta (>700C)
4	0	1	0	DP baixa energia
5	0	1	1	DP baixa energia
6	0	1	2	Falha térmica muito alta (>700C)
				DP baixa energia
7	0	2	0	Falha térmica média (150-300C)
8	0	2	1	Falha térmica alta (300-700C)
9	0	2	2	Falha térmica muito alta (>700C)
10	1	0	0	Sem Falha
				DP alta energia

.... continuação da Tabela 5.3

	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	Diagnóstico após aplicação da TCA
11	1	0	1	Descargas de energia reduzida
12	1	0	2	Descarga de alta energia
13	1	1	0	DP alta energia
14	1	1	1	DP alta energia
				Descargas de energia reduzida
15	1	1	2	DP alta energia
				Descarga de alta energia
16	1	2	0	DP alta energia
				Falha térmica média (150-300C)
17	1	2	1	Descargas de energia reduzida
				Falha térmica alta (300-700C)
18	1	2	2	Descarga de alta energia
				Falha térmica muito alta (>700C)
19	2	0	0	Sem Falha
				Descargas de energia reduzida
20	2	0	1	Descargas de energia reduzida
21	2	0	2	Descargas de energia reduzida
22	2	1	0	Descargas de energia reduzida
23	2	1	1	Descargas de energia reduzida
24	2	1	2	Descargas de energia reduzida
25	2	2	0	Descargas de energia reduzida
				Falha térmica media (150-300C)
26	2	2	1	Descargas de energia reduzida
				Falha térmica alta (300-700C)
27	2	2	2	Descargas de energia reduzida
				Falha térmica muito alta (>700C)

5.3 A metodologia proposta aplicada ao Critério de Rogers

As tabelas originalmente propostas pelo critério de análise de Rogers estão descritas no capítulo 4, Tabela 4.8 e Tabela 4.9.

A Tabela 5.4 mostra todas as combinações possíveis de entrada de dados, totalizando 72 entradas possíveis, e mostra o diagnóstico obtido por cada combinação utilizando as relações originalmente propostas por Rogers.

Tabela 5.4 : Variáveis possíveis conforme Rogers

	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	Diagnóstico
1	0	0	0	0	Deterioração Normal
2	0	0	0	1	Descarga baixa energia, arco sem pot.
3	0	0	0	2	Sem diagnóstico proposto
4	0	0	1	0	Sobreaquecimento condutor isolado
5	0	0	1	1	Descarga baixa energia: potencial flut.
6	0	0	1	2	Descarga baixa energia: potencial flut.
7	0	0	2	0	Sem diagnóstico proposto
8	0	0	2	1	Descarga de alta energia
9	0	0	2	2	Descarga de alta energia
10	0	1	0	0	Falha térmica media (100 – 200C)
11	0	1	0	1	Sem diagnóstico proposto
12	0	1	0	2	Sem diagnóstico proposto
13	0	1	1	0	Sem diagnóstico proposto
14	0	1	1	1	Sem diagnóstico proposto
15	0	1	1	2	Sem diagnóstico proposto
16	0	1	2	0	Sem diagnóstico proposto
17	0	1	2	1	Sem diagnóstico proposto
18	0	1	2	2	Sem diagnóstico proposto
19	1	0	0	0	Falha térmica baixa (150C)
20	1	0	0	1	Sem diagnóstico proposto
21	1	0	0	2	Sem diagnóstico proposto
22	1	0	1	0	Falha térmica alta (150 – 300C)
23	1	0	1	1	Sem diagnóstico proposto
24	1	0	1	2	Sem diagnóstico proposto
25	1	0	2	0	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
26	1	0	2	1	Sem diagnóstico proposto
27	1	0	2	2	Sem diagnóstico proposto
28	1	1	0	0	Falha térmica media (100 – 200C)
29	1	1	0	1	Sem diagnóstico proposto
30	1	1	0	2	Sem diagnóstico proposto
31	1	1	1	0	Sem diagnóstico proposto
32	1	1	1	1	Sem diagnóstico proposto
33	1	1	1	2	Sem diagnóstico proposto
34	1	1	2	0	Sem diagnóstico proposto
35	1	1	2	1	Sem diagnóstico proposto
36	1	1	2	2	Sem diagnóstico proposto
37	2	0	0	0	Sem diagnóstico proposto
38	2	0	0	1	Sem diagnóstico proposto
39	2	0	0	2	Sem diagnóstico proposto
40	2	0	1	0	Sem diagnóstico proposto
41	2	0	1	1	Sem diagnóstico proposto
42	2	0	1	2	Sem diagnóstico proposto
43	2	0	2	0	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
44	2	0	2	1	Sem diagnóstico proposto
45	2	0	2	2	Sem diagnóstico proposto
46	2	1	0	0	Falha térmica media (100 – 200C)
47	2	1	0	1	Sem diagnóstico proposto
48	2	1	0	2	Sem diagnóstico proposto
49	2	1	1	0	Sem diagnóstico proposto
50	2	1	1	1	Sem diagnóstico proposto
51	2	1	1	2	Sem diagnóstico proposto
52	2	1	2	0	Sem diagnóstico proposto

..... Continuação da tabela 5.4

	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	Diagnóstico
53	2	1	2	1	Sem diagnóstico proposto
54	2	1	2	2	Sem diagnóstico proposto
55	5	0	0	0	Descargas Parciais baixa energia
56	5	0	0	1	Descargas Parciais alta energia
57	5	0	0	2	Sem diagnóstico proposto
58	5	0	1	0	Sem diagnóstico proposto
59	5	0	1	1	Sem diagnóstico proposto
60	5	0	1	2	Sem diagnóstico proposto
61	5	0	2	0	Sem diagnóstico proposto
62	5	0	2	1	Sem diagnóstico proposto
63	5	0	2	2	Sem diagnóstico proposto
64	5	1	0	0	Sem diagnóstico proposto
65	5	1	0	1	Sem diagnóstico proposto
66	5	1	0	2	Sem diagnóstico proposto
67	5	1	1	0	Sem diagnóstico proposto
68	5	1	1	1	Sem diagnóstico proposto
69	5	1	1	2	Sem diagnóstico proposto
70	5	1	2	0	Sem diagnóstico proposto
71	5	1	2	1	Sem diagnóstico proposto
72	5	1	2	2	Sem diagnóstico proposto

Observa-se na Tabela 5.4 que das 72 combinações possíveis de resultados, 56 não apresentam diagnóstico proposto.

Após aplicar os conceitos descritos na Teoria dos Conjuntos Aproximados ao critério proposto por Rogers chega-se a Tabela 5.5 com as novas relações de entradas.

Tabela 5.5 : Relações de Rogers após TCA

Diagnóstico	Relações			
	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
Deterioração Normal	0	0	0	0
Descargas Parciais baixa energia	5			0
Descargas Parciais alta energia	5			1
Descarga baixa energia, arco sem pot.	0		0	1
Descarga baixa energia: potencial flut.			1	1
Descarga baixa energia: potencial flut.			1	2
Descarga de alta energia	0		2	
Descarga de alta energia			2	1
Descarga de alta energia			2	2
Sobreaquecimento de condutor isolado	0		1	0
Falha térmica baixa (150°C)	1	0	0	
Falha térmica media (100 – 200°C)		1		
Falha térmica alta (150 – 300°C)	1		1	
Falha térmica muito alta (300 – 700°C)	1		2	
Falha térmica muito alta (300 – 700°C)			2	0
Falha térmica muito alta (300 – 700°C)	2	0		
Falha térmica muito alta (300 – 700°C)	2		2	



Observa-se na Tabela 5.6 que das 72 combinações possíveis de resultados, 70 combinações apresentam diagnóstico proposto, 02 combinações não apresentaram diagnóstico proposto, e nenhum diagnóstico proposto é divergente da tabela original, 28 possibilidades de duplo diagnóstico e 10 possibilidades de triplo diagnóstico.

Aplicando a nova tabela de Rogers, após aplicação da Teoria de Conjunto Aproximados, Tabela 5.6, à totalidade dos dados disponíveis para teste, 7822 resultados de ensaios, observa-se que: Dos 7822 resultados de ensaios testados, 100% dos casos possíveis com diagnóstico conhecido, 4528 (57,888%) apresentaram somente um diagnóstico, 3092 (39,53%) apresentaram dois diagnósticos, e 202 (2,583%) apresentaram três diagnósticos possíveis.

Tabela 5.6 : Variáveis conforme Rogers após redução com TCA.

	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	Diagnóstico
1	0	0	0	0	Deterioração Normal
2	0	0	0	1	Descarga baixa energia, arco sem pot.
3	0	0	0	2	Sem diagnóstico proposto
4	0	0	1	0	Sobreaquecimento condutor isolado
5	0	0	1	1	Descarga baixa energia: potencial flut.
6	0	0	1	2	Descarga baixa energia: potencial flut.
7	0	0	2	0	Descarga de alta energia
					Falha térmica muito alta (300 – 700C)
8	0	0	2	1	Descarga de alta energia
9	0	0	2	2	Descarga de alta energia
10	0	1	0	0	Falha térmica média (100 – 200C)
11	0	1	0	1	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga baixa energia, arco sem pot.
12	0	1	0	2	Falha térmica média (100 – 200C)
13	0	1	1	0	Falha térmica média (100 – 200C)
					Sobreaquecimento condutor isolado
14	0	1	1	1	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga baixa energia: potencial flut.
15	0	1	1	2	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga baixa energia: potencial flut.
16	0	1	2	0	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga de alta energia
					Falha térmica muito alta (300 – 700C)
17	0	1	2	1	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga de alta energia

..... continuação da tabela 5.6 ...

	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₆ /CH ₄	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Diagnóstico
18	0	1	2	2	Falha térmica média (100 – 200C) Descarga de alta energia
19	1	0	0	0	Falha térmica baixa (150C)
20	1	0	0	1	Falha térmica baixa (150C)
21	1	0	0	2	Falha térmica baixa (150C)
22	1	0	1	0	Falha térmica alta (150 – 300C)
23	1	0	1	1	Falha térmica alta (150 – 300C) Descarga baixa energia: potencial flut.
24	1	0	1	2	Falha térmica alta (150 – 300C) Descarga baixa energia: potencial flut.
25	1	0	2	0	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
26	1	0	2	1	Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga de alta energia
27	1	0	2	2	Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga de alta energia
28	1	1	0	0	Falha térmica média (100 – 200C)
29	1	1	0	1	Falha térmica média (100 – 200C)
30	1	1	0	2	Falha térmica média (100 – 200C)
31	1	1	1	0	Falha térmica média (100 – 200C) Falha térmica alta (150 – 300C)
32	1	1	1	1	Falha térmica média (100 – 200C) Falha térmica alta (150 – 300C) Descarga baixa energia: potencial flut.
33	1	1	1	2	Falha térmica média (100 – 200C) Falha térmica alta (150 – 300C) Descarga baixa energia: potencial flut.
34	1	1	2	0	Falha térmica média (100 – 200C) Falha térmica muito alta (300 – 700C)
35	1	1	2	1	Falha térmica média (100 – 200C) Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga de alta energia
36	1	1	2	2	Falha térmica média (100 – 200C) Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga de alta energia
37	2	0	0	0	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
38	2	0	0	1	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
39	2	0	0	2	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
40	2	0	1	0	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
41	2	0	1	1	Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga baixa energia: potencial flut.
42	2	0	1	2	Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga baixa energia: potencial flut.
43	2	0	2	0	Falha térmica muito alta (300 – 700C)
44	2	0	2	1	Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga de alta energia
45	2	0	2	2	Falha térmica muito alta (300 – 700C) Descarga de alta energia

..... continuação da tabela 5 .6 ...

	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₆ /CH ₄	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Diagnóstico
46	2	1	0	0	Falha térmica média (100 – 200C)
47	2	1	0	1	Falha térmica média (100 – 200C)
48	2	1	0	2	Falha térmica média (100 – 200C)
49	2	1	1	0	Falha térmica média (100 – 200C)
50	2	1	1	1	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga baixa energia: potencial flut.
51	2	1	1	2	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga baixa energia: potencial flut.
52	2	1	2	0	Falha térmica média (100 – 200C)
					Falha térmica muito alta (300 – 700C)
53	2	1	2	1	Falha térmica média (100 – 200C)
					Falha térmica muito alta (300 – 700C)
					Descarga de alta energia
54	2	1	2	2	Falha térmica média (100 – 200C)
					Falha térmica muito alta (300 – 700C)
					Descarga de alta energia
55	5	0	0	0	DP baixa energia
56	5	0	0	1	DP alta energia
57	5	0	0	2	Sem diagnóstico proposto
58	5	0	1	0	DP baixa energia
59	5	0	1	1	DP alta energia
					Descarga baixa energia: potencial flut.
60	5	0	1	2	Descarga baixa energia: potencial flut.
61	5	0	2	0	DP baixa energia
					Falha térmica muito alta (300 – 700C)
62	5	0	2	1	DP alta energia
					Descarga de alta energia
63	5	0	2	2	Descarga de alta energia
64	5	1	0	0	Falha térmica média (100 – 200C)
					DP baixa energia
65	5	1	0	1	Falha térmica média (100 – 200C)
					DP alta energia
66	5	1	0	2	Falha térmica média (100 – 200C)
67	5	1	1	0	Falha térmica média (100 – 200C)
					DP baixa energia
68	5	1	1	1	DP alta energia
					Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga baixa energia: potencial flut.
69	5	1	1	2	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga baixa energia: potencial flut.
70	5	1	2	0	DP baixa energia
					Falha térmica média (100 – 200C)
					Falha térmica muito alta (300 – 700C)
71	5	1	2	1	DP alta energia
					Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga de alta energia
72	5	1	2	2	Falha térmica média (100 – 200C)
					Descarga de alta energia

5.3 Conclusão

Neste capítulo foram aplicados conceitos da Teoria de Conjuntos Aproximados e Conjuntos Difusos às tabelas de conhecimento propostas por Rogers e pela NBR 7274/1982.

A finalidade era eliminar falhas nestas tabelas de conhecimento, completando o conhecimento proposto.

Os resultados obtidos demonstram a eficiência da técnica quanto a expansão do conhecimento com a conseqüente eliminação de entradas sem saídas possíveis, isto é, independente dos valores ou combinações de entrada existe uma saída possível.

Ferramenta Computacional e Testes

6.1 Introdução

Neste capítulo será mostrada a ferramenta computacional utilizada para testar a aplicação dos critérios de Rogers e NBR 7274 a casos propostos em [15].

Neste capítulo também são mostrados cinco exemplos utilizados como testes para o sistema proposto, a fim de verificar a correta emissão de diagnósticos confrontando os diagnósticos emitidos pelo sistema com os diagnósticos comprovados pela inspeção dos equipamentos.

6.2 Ferramenta Computacional

A ferramenta computacional foi desenvolvida com o objetivo de permitir testar o sistema proposto, desenvolvida em Visual Basic 6.0 e composta basicamente de 3 módulos. O primeiro módulo refere-se ao tratamento dos dados referentes a identificação do equipamento, o segundo módulo trabalha com os dados advindos da análise cromatográfica de gases, e o terceiro módulo aplica os conceitos de inteligência artificial, descritos nos capítulos 4 e 5 desta dissertação, aos dados armazenados relativos a análise cromatográfica.

A Figura 6.1 mostra a tela principal do sistema onde é possível verificar que a tela está dividida em duas janelas principais, conforme descrito:

- janela superior da tela: encontram-se os dados cadastrais do equipamento, tais como: equipamento, número de operação

(identificação do equipamento na subestação), localização (código do equipamento no sistema de cadastro de equipamentos), número de série, grupo (família a qual o equipamento pertence), fabricante, modelo, potência, tensão data de fabricação, data da primeira energização e data do ultimo tratamento do óleo isolante;

- janela inferior da tela: são mostrados os dados referentes as análises cromatográficas cadastradas para o equipamento selecionado na janela superior da tela;
- barra superior de botões: estes botões são destinados a operar os dados localizados na janela inferior da tela, dados relacionados a análise cromatográfica, onde o botão adicionar adiciona novo registro a base de dados, o botão editar edita dados já cadastrados, o botão remover remove dados já cadastrados e o botão diagnóstico abre uma nova tela contendo o diagnóstico emitido pelo sistema para determinada análise selecionada na janela onde são mostrados os dados da análise cromatográfica;
- barra inferior de botões: estes botões são destinados a operar a janela superior da tela, onde constam os dados cadastrais do equipamento, onde o botão sair determina a interrupção da execução do software, o botão adicionar abre uma janela específica para adição de novo equipamento, o botão editar edita dados de equipamentos já cadastrados, o botão remover remove dados de equipamentos anteriormente cadastrados, e os botões retornar e avançar são botões destinado a retroceder ou avançar os dados dos equipamentos cadastrados. Quando ocorre a mudança dos dados de equipamentos mostrados na janela superior da tela ocorre simultaneamente a alteração dos dados mostrados na janela inferior da tela, fazendo com que os dados das análises cromatográficas mostrados sejam sempre correspondentes ao equipamento mostrado na janela superior da tela.

A Figura 6.2 mostra a tela para edição de dados referentes aos resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia, tanto para cadastro de novos resultados quanto para edição dos dados já cadastrados. O seguintes campos fazem parte desta janela: equipamento, número de operação (identificação do equipamento na subestação),

localização (código do equipamento no sistema de cadastro de equipamentos), local (localização física do equipamento na subestação) parte (parte do equipamento de onde foi sacada a coleta de óleo isolante), folha (numero da folha de medição), temperatura (ambiente), umidade (ambiente), volume Extraído (quantidade de óleo isolante retirado quando tratar-se de buchas), data análise, data coleta, executante.

A Figura 6.3 mostra a tela de edição de diagnóstico, onde são apresentados os dados de identificação do equipamento, resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia e os diagnósticos propostos por Rogers, NB7274 e ainda a indicação de presença de acetileno e envolvimento ou não da celulose na falha.

O diagnóstico é emitido segundo o esquema proposto em 3.4, onde os dados obtidos no ensaio de gás-cromatografia (em ppm) são classificados segundo os métodos de Rogers e NBR 7274, ambos métodos expandidos com a utilização da Teoria de Conjuntos Aproximados e demonstrado no capítulo 5.

Quando os diagnósticos oferecidos na saída da classificação inicial oferecem mais de uma possibilidade, estes dados são então classificados novamente utilizando Conjuntos Difusos baseados no critério de gás-chave, onde a pertinência de cada diagnóstico possível é verificada e o diagnóstico final é então emitido considerando o diagnóstico de maior pertinência entre os possíveis.

Cadastro de Equipamentos

Equipamento: TRANSFORMADOR PRINCIPAL TU17-A

Número de Operação: TU#17-A Localização: B17J19 Número de série: 100296/2

Grupo: TU50A Fabricante: COEMSA Modelo:

Potência: 265 MVA Tensão: 525 KV

Data Fabricação: Dt. Energização: Dt. Ult. Tratamento:

Resultados do ensaio de gás-cromatografia

Data Coleta	Folha	CO	H2	CH4	C2H4
15/08/90	00682/1990	50	3	1	1
12/10/90	00885/1990	50	3	1	1
23/10/90	00924/1990	50	3	1	1
12/11/90	00983/1990	0	156	1	1
16/11/90	01019/1990	50	3	2	1
19/01/91	00061/1991	50	99	4	3
19/01/91	00061/1991	50	99	4	3
23/01/91	00099/1991	50	228	6	6
23/01/91	00099/1991	50	228	6	6
31/01/91	00108/1991	0	12	7	6
20/02/91	00182/1991	50	9	7	6
06/03/91	00276/1991	50	12	17	16
06/03/91	00276/1991	50	12	17	16

Diagnóstico Adicionar Editar Remover

Sair Adicionar Editar Remover Retornar Avançar

Figura 6.1: Tela principal do sistema

Resus

Número de operação: TU#18-C Localização: F01F01

Equipamento: TRANSFORMADOR 01 Local de instalação:

Parte do equipamento: Folha de medição:

Temperatura: Umidade:

CO: O2:

H2: N2:

CH4: CO2:

C2H4: SF6:

C2H6: Total de gases:

C2H2: Volume Extraído:

Total de gases combustíveis:

Data da análise: Data da coleta:

Executante:

Confirmar Cancelar

Figura 6.2: Tela para cadastro de resultados

Número de série: 100296/2
 Equipamento: TRANSFORMADOR PRINCIPAL TU17-A
 Localização: B17J19

Data de coleta: 23/01/91
 Folha de medição: 00099/1991
 Local: ELEV.108

CO:	50	O2:	10700
H2:	228	N2:	54100
CH4:	6	CO2:	170
C2H4:	6	SF6:	0
C2H6:	1	TGAS:	65261
C2H2:	0	VOLEXT:	0
TCOM:	291		

NBR_New => Falha térmica muito alta (>700C)
 Rogers_New => Descargas parciais de baixa energia
 Celulose Possivelmente envolvida na falha

Figura 6.3: Tela de diagnóstico

6.3 Testes

Neste item serão mostrados testes realizados com o sistema proposto, utilizando como ferramenta computacional a descrita em 5.2 e dados extraídos de [15]. Em [15] são mostrados casos verídicos ocorridos em empresas do setor elétrico brasileiro. Nos casos exemplo descritos a seguir, serão omitidos dados relativos a identificação do fabricante do equipamento e da empresa proprietária do equipamento.

Os testes estão constituídos das seguintes etapas:

- A. características do equipamento, dados do equipamento necessários para uma correta interpretação dos resultados, dados fornecidos pelo autor em [15];
- B. histórico, fatos relevantes sobre a condição operativa do equipamento e evolução de gases, dados fornecidos pelo autor em [15];
- C. identificação da falha, nesta etapa do teste é relatada a identificação da falha feita pelos autores em [15] utilizando os métodos de Rogers, NBR7274, Dörnemburg, Duval e Laborelec, na forma original sem utilização de técnicas de inteligência artificial;
- D. inspeção, conforme mencionado em [15] é descrita a apuração da falha após inspeção interna ao equipamento, onde é feita a comprovação ou não do diagnóstico proposto durante a etapa de identificação da falha;
- E. tabela com valores históricos; são mostrados alguns dos resultados históricos de análise cromatográfica do óleo isolante coletado do equipamento, divulgados em [15];
- F. saída da ferramenta computacional, é mostrada uma copia da tela de saída da ferramenta computacional (software) com os dados cadastrais do equipamento, os resultados da análise cromatográfica e os diagnósticos propostos pela ferramenta computacional;
- G. conclusão, nesta etapa do teste é feita a validação do diagnóstico proposto pela ferramenta computacional em comparação com os resultados obtidos na etapa de inspeção do equipamento. Também é feita uma comparação entre os diagnósticos propostos na saída da ferramenta computacional com os diagnósticos propostos na etapa da identificação da falha.

6.3.1 TESTE 01:

A . Características do equipamento:

- Tipo: Autotransformador
- Tensão: 765/512/69kV
- Potência: 550MVA
- Fases: Monofásico
- Volume de óleo: 87700 Litros
- Sistema de preservação: selado com membrana de borracha
- LTC: Sem comutador sob-carga
- Ano de Fabricação: 1980

B . Histórico: Na amostra programada coletada em 11.10.1984, foi detectada pela cromatografia uma evolução anormal de gases combustíveis, principalmente acetileno (500ppm), e hidrogênio (1200ppm). Os ensaios elétricos realizados em campo não detectaram qualquer evidência de falha [15].

C . Identificação da falha: Conforme descrito em [15] a identificação da falha utilizando os resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia e analisando estes resultados com os métodos de Rogers, NBR7274, Dörnemburg, Duval e Laborelec indicavam:

- Rogers: sem diagnóstico;
- NBR 7274: sem diagnóstico;
- Dörnemburg: sem diagnóstico ;
- Durval: arco de alta energia;
- Laborelec: descargas parciais muito importantes

D . Inspeção: O equipamento mencionado, foi transportado até a fabrica, onde sofreu inspeção interna com parecer do fabricante indicando a provável geração de gases devido ao sobre-aquecimento localizado, causado por uma corrente de circulação nas fixações metálicas da blindagem elétrica. Segundo o fabricante do equipamento, a decisão de retirar

o equipamento de operação baseada nos resultados de análise cromatográfica, foi altamente acertada e procedente, permitindo que fossem evitadas conseqüências mais graves [15].

E . Tabela com valores históricos: A Tabela 6.1 mostra os valores obtidos nos ensaios de gás-cromatografia para este equipamento.

Tabela 6.1: Valores para teste 01

Data	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Co	CO ₂	O ₂	N ₂	TGC
10/12/82	16	5	2	5	0	130	370	6600	39000	158
19/08/83	13	8	4	5	0	140	530	1300	20000	170
04/06/84	8	7	4	3	0	100	670	1500	8600	122
11/10/84	1200	64	12	41	500	340	2200	4000	24000	2157

F . Saída da ferramenta computacional: A Figura 6.4 mostra o diagnóstico proposto pelo sistema utilizando os métodos de análise de Rogers e NBR 7274 após aplicação da metodologia proposta nesta dissertação.

G . Conclusão: Na etapa de identificação da falha está descrito em [15] que não houve emissão de diagnóstico pelos critérios de Rogers e NBR7274 caracterizando uma falha na tabela de conhecimento original destes métodos.

A ferramenta computacional emitiu diagnóstico para ambos os métodos conforme mostrado na Figura 6.4, e o diagnóstico proposto foi validado pelo parecer do fabricante do equipamento após inspeção interna.



Número de série:	100296/1		
Equipamento:	TRANSFORMADOR 01		
Localização:	F01F01		
<hr/>			
Data de coleta:	11/10/84		
Folha de medição:	00001/1985		
Local:	.		
<hr/>			
CO:	340	O2:	4000
H2:	1200	N2:	24000
CH4:	64	CO2:	2200
C2H4:	41	SF6:	0
C2H6:	12	TGAS:	32357
C2H2:	500	VOLEXT:	0
TCOM:	2157		
<hr/>			
NBR_New => Descargas de energia reduzida			
Rogers_New => Descargas de alta energia			
Celulose com envelhecimento normal			
Existe geração de Acetileno			
<hr/>			
 Sair  Imprimir			

Figura 6.4: Diagnóstico proposto para o teste 01

6.3.2 TESTE 02:

A . Características do equipamento:

- Tipo: Transformador;
- Tensão: 345/15kV;
- Potência: 53,33MVA;
- Fases: Monofásico;
- Volume de óleo: 38000 Litros;
- Sistema de preservação: não selado com conservador e sílica gel;
- LTC: sem comutador sob-carga;
- Ano de Fabricação: 1982.

B . Histórico: este transformador apresentou evolução normal de gases combustíveis desde sua energização até a amostra coletada em 01.02.84 inclusive. Na amostra coletada em 04.02.85 os resultados indicaram uma evolução anormal de gases e o equipamento foi colocado em monitoração. A partir de junho de 1985 houve a diminuição gradual na concentração dos gases combustíveis e então, após fevereiro de 1987, a monitoração foi interrompida [15].

C . Identificação da falha: Conforme descrito em [15] a identificação da falha para os resultados obtidos em 01.02.84, foi caracterizada tanto pelo método de Rogers como pelo método NBR 7274 como: Descarga de alta intensidade. A estabilização e posterior redução do teor dos gases combustíveis indica que o defeito se auto-extinguiu após um determinado período.

D . Inspeção: a inspeção interna do equipamento mostrou a causa do defeito como mau contato entre o tape fixo e o móvel do comutador sem tensão, provocando grande aquecimento local, devido ao desprendimento parcial de um parafuso que potencializa a blindagem de duralumínio com posterior soldagem deste parafuso, o que justifica a redução da taxa de geração de gases combustíveis [15].

E . Tabela com valores históricos: a Tabela 6.2 mostra os resultados obtidos no ensaio de gás-cromatografia.

Tabela 6.2: Valores para teste 02

Data	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Co	CO ₂	O ₂	N ₂	TGC
04/02/85	82	28	17	100	13	910	18000	20000	69000	1150
27/05/85	92	69	29	190	32	1100	---	15000	64000	1356
24/01/86	44	34	31	160	11	660	10000	17000	66000	940
12/02/87	43	18	12	57	2	660	8700	3500	65000	792

F . Saída da ferramenta computacional: a Figura 6.5 mostra o diagnóstico proposto pelo sistema utilizando os métodos de análise de Rogers e NBR 7274 após aplicação da metodologia proposta nesta dissertação.

G . Conclusão: O diagnóstico proposto na etapa de identificação da falha coincide com o diagnóstico emitido pela ferramenta computacional e é validado pela inspeção do equipamento.



Número de série:	100296/1		
Equipamento:	TRANSFORMADOR 02		
Localização:	F01F02		
<hr/>			
Data de coleta:	04/02/85		
Folha de medição:	00002/1985		
Local:	.		
<hr/>			
C0:	910	O2:	20000
H2:	82	N2:	69000
CH4:	28	CO2:	18000
C2H4:	100	SF6:	0
C2H6:	17	TGAS:	108150
C2H2:	13	VOLEXT:	0
TCOM:	1150		
<hr/>			
NBR_New => Descargas de alta energia			
Rogers_New => Descargas de alta energia			
Celulose com envelhecimento normal			
Existe geração de Acetileno			
<hr/>			
 Sair  Imprimir			

Figura 6.5: Diagnóstico proposto para o teste 02

6.3.3 TESTE 03:

A . Características do equipamento:

- Tipo: Transformador;
- Tensão: 500/138/13,8kV;
- Potência: 200MVA;
- Fases: Monofásico;
- Volume de óleo: 75000 Litros;
- Sistema de preservação: não selado com conservador e sílica gel;
- LTC: com LTC, óleo isolante do compartimento do LTC (Load Tap Changer) sem comunicação com o tanque principal do transformador;
- Ano de Fabricação: 1980.

B . Histórico: este transformador vinha operando com evolução normal de gases combustíveis, até a amostra coletada em 29/04/1984 inclusive. Na amostra seguinte, coletada em 26/03/1985, foi verificado um crescimento anormal de alguns gases, posteriormente confirmado numa re-amostragem de 08/05/1985. O equipamento foi retirado de operação baseado nos resultados da análise cromatográfica para inspeção interna e tentativa de localização do defeito [15].

C . Identificação da falha: Conforme descrito em [15] foram aplicados os métodos de Rogers, NBR 7274, Dörnemburg, Duval, e Laborelec, na amostra coletada em 08/05/1985 (última amostragem antes da retirada de operação), sendo obtidos os seguintes diagnósticos:

- Rogers: sem diagnóstico;
- NBR 7274: sem diagnóstico;
- Dörnemburg: sem diagnóstico;
- Duval: arco de baixa energia;
- Laborelec: arco (óleo) ou gás proveniente do comutador – Importante

Pela análise dos resultados, concluiu-se pela existência no transformador de uma falha com formação de arco no óleo isolante (descargas), sem envolvimento da celulose [15].

D . Inspeção: durante a inspeção foi detectada uma conexão deficiente do aterramento do shield (anel de corona) ao tanque, na saída do condutor de AT. O aterramento do anel estava frouxo, originando um centelhamento contínuo entre anel e a chapa do tanque, que se apresentava corroída pelas descargas incidentes sobre a mesma [15].

E . Tabela com valores históricos: a Tabela 6.3 apresenta alguns dos resultados das análises cromatográficas deste equipamento.

Tabela 6.3: Valores para teste 03

Data	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Co	CO ₂	O ₂	N ₂	TGC
26/03/83	23	98	140	18	1	84	1000	2200	46000	364
29/04/84	14	90	170	14	0	120	920	6400	74000	408
26/03/85	300	120	250	30	96	170	1300	3600	75000	966
08/05/85	550	140	230	54	200	160	----	3800	74000	1334

F . Saída da ferramenta computacional: a Figura 6.6 mostra o diagnóstico proposto pelo sistema utilizando os métodos de análise de Rogers e NBR 7274 após aplicação da

metodologia proposta nesta dissertação. Para emissão deste diagnóstico foi utilizada a amostra realizada no dia 08/05/85.

G . Conclusão: Na etapa de identificação da falha está descrito em [15] que não houve emissão de diagnóstico pelos critérios de Rogers e NBR7274 caracterizando uma falha na tabela de conhecimento original destes métodos.

A ferramenta computacional emitiu diagnóstico para ambos os métodos conforme mostrado na Figura 6.6, sendo o diagnóstico proposto pela NBR 7274 validado pelo parecer do fabricante do equipamento após inspeção interna.

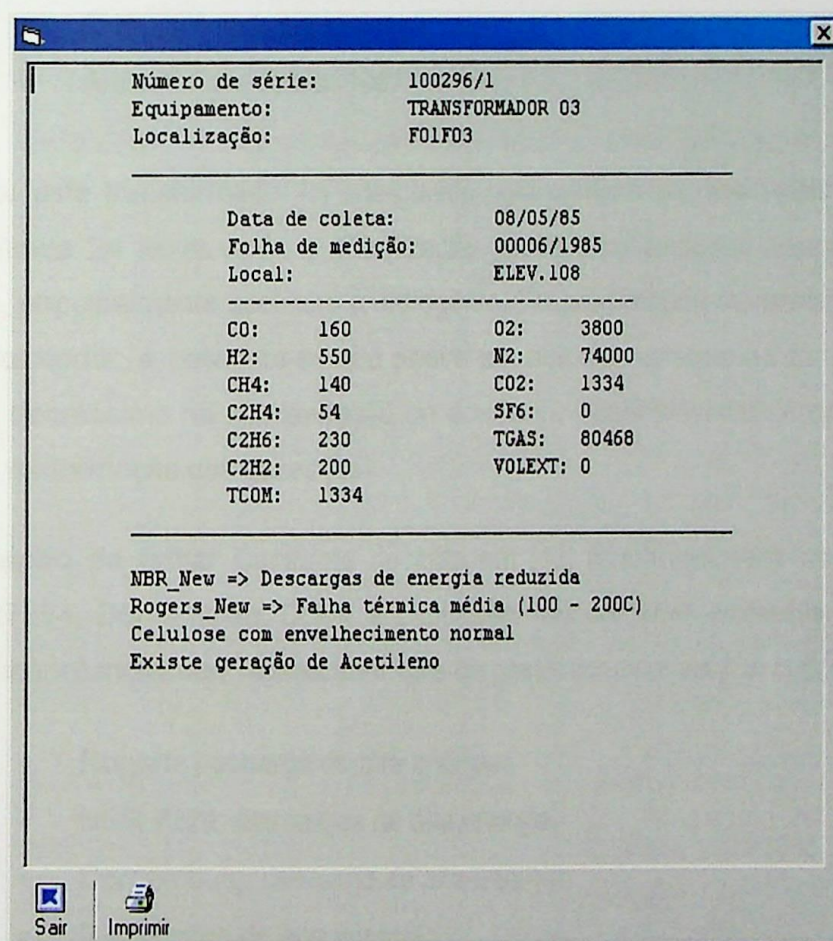


Figura 6.6: Diagnóstico proposto para o teste 03

6.3.4 TESTE 04:

A . Características do equipamento:

- Tipo: Transformador;
- Tensão: 230/138/13,8kV;
- Potência: 33,3MVA;
- Fases: Monofásico;
- Volume de óleo: 13260 Litros;
- Sistema de preservação: não selado com conservador e sílica gel;
- LTC: com LTC, óleo isolante do compartimento do LTC (Load Tap Changer) sem comunicação com o tanque principal do transformador;
- Ano de Fabricação: 1981.

B . Histórico: este transformador foi energizado pela primeira vez em 14/08/1986 e já na amostra realizada 24 horas após a energização houve uma evolução anormal de gases combustíveis, principalmente acetileno e hidrogênio. Foi programada monitoração quinzenal para o transformador, e observou-se que houve um aumento gradual na concentração do etileno e um decréscimo na concentração de acetileno. Posteriormente constatou-se uma estabilização na formação dos gases [15].

C . Identificação da falha: Conforme descrito em [15] foram aplicados os métodos de Rogers, NBR7274, Dörnemburg, Duval, e Laborelec, nas amostras coletadas em 16/01/86 (primeiro resultado) indicando valores anormais de gases combustíveis foi obtido:

- Rogers: descarga de alta energia;
- NBR 7274: descargas de alta energia;
- Dörnemburg: descarga de alta energia;
- Duval: arco de alta energia;
- Laborelec: envelhecimento normal.

Pela investigação dos resultados o autor desconfiou que o defeito poderia se encontrar no comutador de derivação sem tensão, cujos contatos inicialmente apresentaram centelhamento. Em seguida, provavelmente pela vibração do equipamento, provocou o surgimento de uma conexão de resistência ôhmica elevada. O baixo teor de gases

combustíveis encontrados é explicado pelo fato de que o transformador estava operando com carga baixa (3 MVA) [15].

D . Inspeção: os primeiros ensaios realizados na subestação revelaram resistência ôhmica do enrolamento da AT significativamente mais elevada na posição 1, 2 e 3 do comutador em derivação sem tensão, além de divergentes em relação aos ensaios de fábrica. Ao desmontar o comutador encontrou-se eletro-erosão no contato móvel do grupo 3 e no contato fixo da posição 3 correspondente, com depósito de carvão [15].

E . Tabela com valores históricos: a Tabela 6.4 apresenta alguns dos resultados das análises cromatográficas deste equipamento.

Tabela 6.4: Valores para teste 04

Data	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	TGC
07/01/86	3	2	1	4	0	55	360	11000	53000	65
16/01/86	20	4	1	5	6	73	400	9200	61000	109
30/01/86	26	7	2	11	6	110	580	5500	5900	162
13/03/86	36	17	4	25	5	210	1100	4000	67000	297

F . Saída da ferramenta computacional: a Figura 6.7 mostra o diagnóstico proposto pelo sistema utilizando os métodos de análise de Rogers e NBR 7274 após aplicação da metodologia proposta nesta dissertação. Para emissão deste diagnóstico foi utilizada a amostra realizada no dia 16/01/1986.

G . Conclusão: O diagnóstico proposto na etapa de identificação da falha coincide com o diagnóstico emitido pela ferramenta computacional e é validado pela inspeção do equipamento.

Número de série:	100296/1		
Equipamento:	TRANSFORMADOR 04		
Localização:	FO1F04		
<hr/>			
Data de coleta:	16/01/86		
Folha de medição:	00005/1995		
Local:	ELEV.108		
<hr/>			
C0:	55	02:	9200
H2:	20	N2:	61000
CH4:	4	C02:	109
C2H4:	5	SF6:	0
C2H6:	1	TGAS:	70400
C2H2:	6	VOLEXT:	0
TCOM:	91		
<hr/>			
NBR_New => Descargas de alta energia			
Rogers_New => Descargas de alta energia			
Celulose envolvida na falha			
Existe geração de Acetileno			

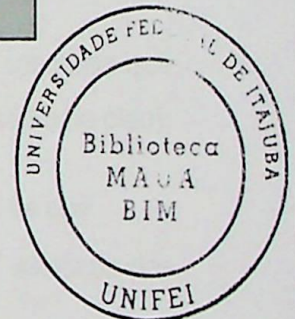
Sair Imprimir

Figura 6.7: Diagnóstico proposto para o teste 04

6.3.5 TESTE 05:

A . Características do equipamento:

- Tipo: Transformador;
- Tensão: 345/15/13,8kV;
- Potência: 53,333MVA;
- Fases: Monofásico;
- Volume de óleo: 37600 Litros;
- Sistema de preservação: não selado com conservador e sílica gel;
- LTC: sem LTC;
- Ano de Fabricação: 1962.



B . Histórico: este transformador foi re-energizado em 17/10/1987 após regeneração do óleo isolante,. Na amostra programada e coletada em 08/02/1988 apresentou 8ppm de acetileno e 28 ppm de hidrogênio, passando a ser monitorado. Na amostra eventual coletada em 11/03/1988, foi observado aumento da concentração de acetileno de 8 para 12 ppm, confirmando a existência de uma falha incipiente [15].

Foram realizados ensaios elétricos em campo não sendo detectada qualquer anormalidade [15].

C . Identificação da falha: Conforme descrito em [15] aplicando os métodos de Rogers, NBR7274, Dörnemburg, Duval, e Laborelec, no resultado da amostra de 11/03/88, obteve-se:

- Rogers: descarga de alta energia;
- NBR 7274: descargas de energia reduzida;
- Dörnemburg: sem diagnóstico definido;
- Duval: arco de alta energia;
- Laborelec: degradação media, centelhamento no óleo.

Pela análise de diversos critérios de diagnósticos de falhas, foi concluído que o equipamento apresentava um defeito típico de descargas no óleo (centelhamento no óleo).

D . Inspeção: Conforme descrito em [15], após drenar o óleo isolante verificou-se que:

- Estavam frouxas as cordoalhas de cobre dos dois "shields" estáticos das bobinas do transformador.
- Um dos quatro parafusos que fixam o terminal do condutor à bucha;

E . Tabela com valores históricos: a Tabela 6.5 apresenta alguns dos resultados das análises cromatográficas deste equipamento.

Tabela 6.5: Valores para teste 05

Data	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	TGC
16/10/87	1	1	0	0	0	16	89	8300	26000	18
19/10/87	2	2	0	1	0	62	280	11000	32000	67
08/02/88	28	6	1	13	8	500	3400	18000	60000	556
11/03/88	25	7	1	19	12	570	4500	21000	68000	634

F . Saída da ferramenta computacional: a Figura 6.8 mostra o diagnóstico proposto pelo sistema utilizando os métodos de análise de Rogers e NBR 7274 após aplicação da metodologia proposta nesta dissertação. Para emissão deste diagnóstico foi utilizada a amostra realizada no dia 11/03/1988.

G . Conclusão: O diagnóstico proposto na etapa de identificação da falha coincide com o diagnóstico emitido pela ferramenta computacional e é validado pela inspeção do equipamento.

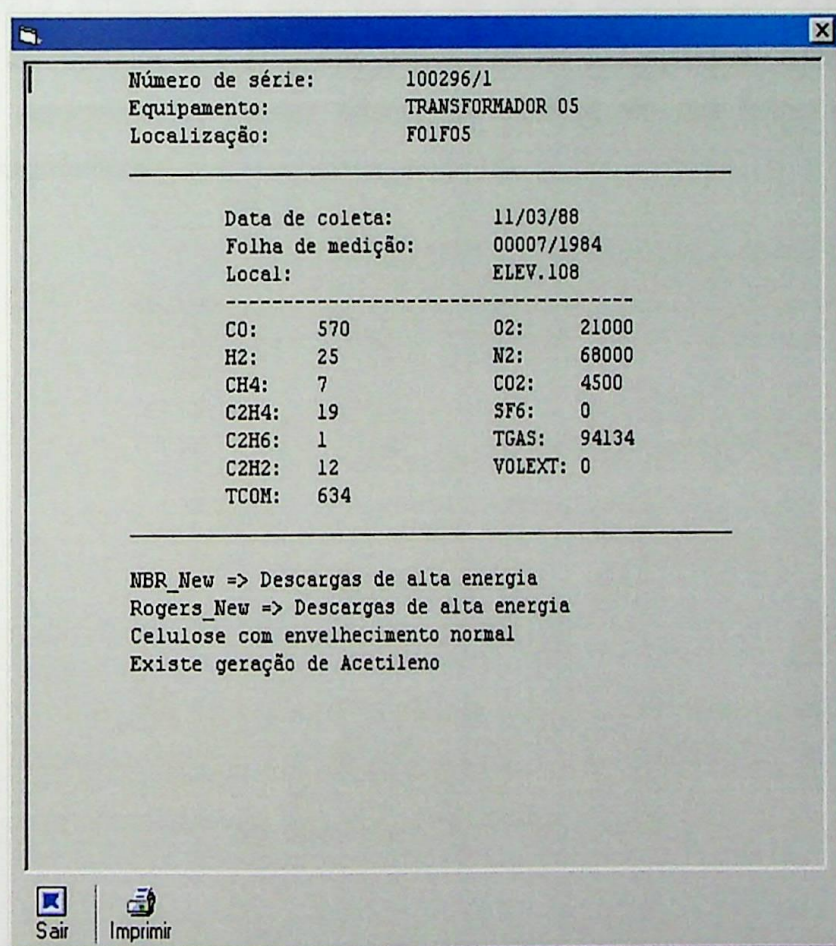


Figura 6.8: Diagnóstico proposto para o teste 05

6.4 Conclusão

Neste capítulo foram mostrados a ferramenta computacional utilizada para testes e os resultados de alguns dos testes realizados, não foram mostrados aqui todos os testes realizados pois não há finalidade estatística quanto a estes dados, uma vez que os métodos propostos por Rogers e NBR 7274 após terem seus diagnósticos expandidos com a utilização da teoria de Conjuntos Aproximados e eliminados os diagnósticos múltiplos com a utilização do critério de gás-chave associado a Teoria dos Conjuntos Difusos, mostraram ser adequados para emissão de diagnósticos nos casos testados, com acerto quando confrontados os diagnósticos propostos pelo sistema e o diagnóstico comprovado pela inspeção do equipamento, mesmo quando os métodos em sua forma original não propunham diagnósticos.

Conclusão

Neste trabalho foi mostrado que o envelhecimento de um transformador está diretamente relacionado com o envelhecimento do papel isolante e por sua vez o envelhecimento do papel isolante está diretamente relacionado com o tipo de preservação do transformador, os critérios de manutenção adotados e principalmente a condição operativa a que o transformador é exposto.

Acompanhar o envelhecimento do papel isolante, e por conseqüência o envelhecimento do transformador, é uma necessidade técnica e econômica, pois pode indicar necessidades de investimentos futuros como reparos ou até mesmo reposição de equipamentos.

Dentro deste contexto a manutenção preditiva de equipamentos ganha vital importância no fornecimento de parâmetros que indiquem a condição operativa do equipamento, promovendo economia em investimentos em manutenções preventivas ou corretivas desnecessárias.

A análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante é uma das principais técnicas preditivas em uso pela engenharia de manutenção responsável pelo acompanhamento da condição operativa de transformadores.

A interpretação dos valores obtidos no ensaio de análise cromatográfica de gases dissolvidos dá-se através de métodos propostos como a NBR 7274, Rogers, Duval, Laborelec, Dörnemburg e Critério de Gás-chave.

Estes métodos tem como entrada em suas tabelas de conhecimento os valores obtidos no ensaio de gás-cromatografia e como saída diagnósticos propostos.

Alguns destes diagnósticos apresentam uma tabela de conhecimento incompleta, isto é, não emitem diagnóstico para determinada combinação de valores de entrada.

A fim de contribuir para uma melhor interpretação dos resultados obtidos na análise cromatográfica de gases dissolvidos este trabalho expandiu a tabela de conhecimento de dois métodos, Rogers e NBR 7274, tendo eliminado as falhas nas tabelas de conhecimento destes métodos.

Como ferramentas para isto foram utilizadas técnicas de inteligência artificial como Teoria dos Conjuntos Aproximados (Rough Sets) e Sistemas Difusos (Fuzzy Logic).

Quando da aplicação dos conceitos da Teoria dos Conjuntos Aproximados às tabelas de conhecimento dos métodos mencionados, ocorreu a eliminação de entradas sem saídas possíveis, isto é, independente dos valores ou combinações de entrada existe uma saída possível.

Tanto no método proposto por Rogers quanto no método proposto pela NBR7274 após aplicação dos conceitos da Teoria de Conjuntos Aproximados ocorreram saídas múltiplas, mais de um diagnóstico possível para uma mesma combinação de valores de entrada.

A escolha entre qual dos diagnósticos seria o mais adequado para os valores de entrada é feita através do critério de gás-chave, onde a maior concentração de determinado gás entre os gases combustíveis determina o tipo de falha característica.

A implementação do critério de gás-chave foi realizada utilizando Sistemas Difusos, onde não mais temos um valor absoluto de concentração de determinado gás e sim uma faixa de valores nos quais os valores extremos a esta faixa indicam uma pertinência menor de participação deste gás na caracterização da falha, e o valor central indica uma pertinência máxima de participação deste gás na caracterização da falha.

Com a soma das pertinências de cada gás em cada falha característica possível é fornecida a pertinência de cada falha característica proposta pelo método do gás-chave.

De acordo com as saídas múltiplas fornecidas pelos métodos de Rogers e NBR7274 é verificada a falha característica de maior pertinência no método de gás-chave, definindo a saída do sistema de análise.

Após obtenção dos resultados nos testes realizados, verificou-se que o sistema de análise proposto é adequado, com saídas comprovadas pela inspeção dos equipamentos sob teste.

Com a obtenção destes resultados, o trabalho apresenta uma solução às falhas nas tabelas de conhecimento dos métodos de Rogers e NBR7274, oferecendo melhores condições para análise de falhas incipientes em transformadores com a parte ativa imersa em óleo isolante através dos resultados da análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante, do que as condições oferecidas pela aplicação dos métodos de Rogers e NBR7274 no formato original.

As técnicas de inteligência artificial aplicadas neste trabalho poderiam ser expandidas a outros métodos como Dörnemburg. Por serem métodos que necessitam do apoio de outros métodos para análise de falha, optou-se por não tratá-los.

A ferramenta computacional apresentada é de fácil utilização por ter sido criada em um ambiente visual, e tem excelente capacidade para emissão de diagnósticos conforme metodologia proposta neste trabalho.

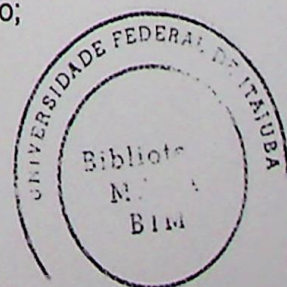
Foi constatada a maleabilidade da Teoria de Conjuntos Aproximados utilizada junto com Conjunto Difusos.

“A interpretação dos resultados advindos do ensaio de gás-cromatografia segue sendo uma arte”, conforme afirma Milan Milash, onde apenas um diagnóstico emitido por determinado método de análise não é suficiente para uma correta interpretação.

O benefício apresentado neste trabalho foi diminuir o grau de incerteza em determinados métodos, fornecendo maiores subsídios para o especialista que tem como função interpretar os resultados obtidos na gás-cromatografia.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Acrescentar demais métodos de análise como Laborelec, Duval e Dörnemburg ao sistema de análise proposto na ferramenta computacional apresentada;
- Utilizar o critério de 2-furfuraldeído como método de previsão de final-vida do transformador em conjunto com o sistema proposto;



- Agregar os conceitos de família de equipamentos e taxa de geração de gases combustíveis aos métodos expostos neste trabalho;

Incorporação de valores de ensaios elétricos e histórico de manutenções corretivas a fim de subsidiar maior conhecimento ao especialista responsável pela análise das condições operativas do equipamento.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

- [1] LUÍS CORDEIRO DE BARROS FILHO, Reflexo da privatização na manutenção: ambiente Brasil, artigo publicado na revista Manutenção, edição nº69 de Outubro e Novembro de 1998, pág. 16-19;
- [2] SOM – SISTEMA DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO, Sistema de Gerenciamento da Manutenção desenvolvido e aplicado na Itaipu Binacional;
- [3] GIL BRANCO FILHO, Dicionário de termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade, 1996, Associação Brasileira de Manutenção, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- [4] NBR 5356, DEZ/1981, Transformador de Potência, Especificação, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- [5] MILTON BINDA, "Papel para Isolamento Elétrico", Furnas Centrais Elétricas S.A., Março/1998;
- [6] GRIFFIN, P.J.: "monitoring the Integrity of Cellulose Insulation in Order to Determine power Transformer Life". The minutes of the Fifty-Eight Annual International Conference of Doble Clients, Sec 6-16.2 to 6-16.5.
- [7] BURTON, P.J.; GRAHAM, J; CARBALLEIRA, M.; DE PABLO, A.; DUVAL, M.; SAMAT, J.; FULLER, C.W.; SPICAR, E.: "Application of Liquid Chromatography to the Analysis of Electrical Insulating Materials". CIGRÉ 15-08 – International Conference on Large High Voltage Electric Systems – CIGRÉ, Paris, 1988".
- [8] XUE CHENDONG, Monitoring Paper Insulation Aging By Measuring Furfural Contents In Oil, Electric Power research Institute 7th International Symposium on High Voltage Engineering – ISH;

- [9] JOSÉ TENÓRIO BARRETO JÚNIOR, GILCINEA RANGEL PESENTI, JOSE ANTONIO M. CHAVES, Influência da Manutenção no Óleo isolante de Transformadores de Potência, Sobre as Concentrações de Furanos (Fal-2), LIGHT S.E.S.A., publicado no VII Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ, Cidade del Este, Parguay, 30 de Maio de 1999;
- [10] NBR 5416, DEZ/1981, Aplicação de cargas em Transformadores de Potência, Procedimento, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- [11] MILTON BINDA E JOSÉ CARLOS DE C. BRANDÃO, Análise Cromatográfica de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante para Monitorar a Operação de Equipamentos, Furnas Centrais Elétricas S.A., artigo publicado no 19º Encontro Técnico do GTMS (Grupo de Trabalho de Manutenção de Subestações), Campinas, SP, Agosto de 1988.
- [12] NBR 7274, Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em serviço, Abril/1982, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)
- [13] NBR 7070, Guia para amostragem de gases e óleo isolante em transformadores e análise dos gases livres e dissolvidos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, DEZ/1981.
- [14] MILAN MILASCH, Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante, Edgar Blücher; Itajubá - MG; Escola Federal de Engenharia, 1984;
- [15] SCM047: "Recomendação para Utilização da Análise Cromatográfica em Óleo Mineral Isolante na Recepção e na Manutenção de Equipamentos", Grupo Coordenador para Operação Interligada, GCOI
- [16] ALEXANDRE CID, DANTE JOSÉ, Mineração de Dados com Técnicas de Rough Sets, Dissertação apresentada à PUC/Rio, Dezembro de 2000
- [17] POLKOWSKI L., SKOWRON A. - Rough Sets in Knowledge Discovery, Methodology and Applications, Vol. 1-2, Physica-Verlag.
- [18] UCHÔA, JOAQUIM QUINTEIRO - Representação e indução de conhecimento usando teoria de conjuntos aproximados, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, 1998.

- [19] BONISSONE, P. PLAUSIBLE REASONING. IN; SHAPIRO, S. C.; ECKROTH, D. & VALASSI, G. A. (Eds.) Encyclopedia of Artificial Intelligence. New York, John Wiley & Sons, 1991. p. 854-863.
- [20] NICOLETTI, MARIA DO CARMO, UCHÔA, JOAQUIM QUINTEIRO, Elementos da Teoria de Conjuntos Aproximados, Relatório Técnico, Universidade Federal de São Carlos, 1997.
- [21] PAWLAK, ZDZISLAW ; ROUGH SETS, Theoretical Aspects of Reasoning about Data, Institute of computer Science, Warsaw University of Technology Library of Congress Cataloging-in-Publication Data ISBN 0-7923-1472-7 Kluwer Academic Publisher, Netherlands
- [22] SZLADOW, A. & ZIARKO - Rough sets: working with imperfect data. *AI Expert*, (July):36-41, 1993.
- [23] B. VALIQUETTE, G. LAMBERT-TORRES E D. MUKHEDKAR - "An Expert System Based Diagnosis and Advisor Tool for Teaching Power System Operation Emergency Control Strategies", IEEE-PWRS, Vol. 6, No. 3, pp. 1315-1322.
- [24] ROSSI, RONALDO, Classificador Hierárquico Sistemático para Redes de Alta Tensão, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Itajubá, 2000.
- [25] CARVALHO, JAQUELINE CORRÊA SILVA, Aplicação de conjuntos aproximados utilizando banco de dados relacionais, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Itajubá, 2000
- [26] G. LAMBERT-TORRES, R. ROSSI, J. A. JARDINI, A. P. ALVES DA SILVA e V.H. QUINTANA, Power system security analysis based on rough classification. Book Chapter ROUGH-FUZZY HYBRIDIZATION: NEW TREND IN DECISION MAKING, S.K. Pal & A Skowron (Ed.) Springer-Verlag Co.
- [27] L. A. ZADEH - "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol.8, pp.338-353, 1965.
- [28] GERMANO LAMBERT TORRES E ALEXANDRE PINTO ALVES DA SILVA, Curso: Inteligência Artificial, Lógica Difusa (Fuzzy Logic), Itaipu Binacional, 1994
- [29] A. KAUFMANN , Introdução to the Theory of Fuzzy Subsets, Vol. I, Academic Press, 1975.