



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**UM MÉTODO *FUZZY* PARA PROGRAMAÇÃO DE INSPEÇÕES EM  
TRANSFORMADORES BASEADO NA ANÁLISE DE GASES COMBUSTÍVEIS E  
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO ÓLEO ISOLANTE**

MÁRCIA PRISCILA FURTADO PANTOJA

UFPA / ICEN / PPGCC  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

MÁRCIA PRISCILA FURTADO PANTOJA

UM MÉTODO *FUZZY* PARA PROGRAMAÇÃO DE INSPEÇÕES EM TRANSFORMADORES  
BASEADO NA ANÁLISE DE GASES COMBUSTÍVEIS E PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS  
DO ÓLEO ISOLANTE

UFPA / ICEN / PPGCC  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

MÁRCIA PRISCILA FURTADO PANTOJA

UM MÉTODO *FUZZY* PARA PROGRAMAÇÃO DE INSPEÇÕES EM  
TRANSFORMADORES BASEADO NA ANÁLISE DE GASES COMBUSTÍVEIS E  
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO ÓLEO ISOLANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, do Instituto de Ciências Exatas e Naturais, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Morais da Silveira.

UFPA / ICEN / PPGCC  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2014

---

catalográfica Ficha

---

# Ficha já impressa

MÁRCIA PRISCILA FURTADO PANTOJA

UM MÉTODO *FUZZY* PARA PROGRAMAÇÃO DE INSPEÇÕES EM  
TRANSFORMADORES BASEADO NA ANÁLISE DE GASES COMBUSTÍVEIS E  
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO ÓLEO ISOLANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, do Instituto de Ciências Exatas e Naturais, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Morais da Silveira.

## BANCA EXAMINADORA

.....  
Prof. Dr. Antonio Morais da Silveira.  
Orientador – PPGCC/UFPA.

.....  
Prof. Dra. Terezinha Ferreira de Oliveira  
Co-Orientador- PPGME/UFPA

.....  
Prof. Jefferson Magalhães Morais (PPGCC-UFPA)

.....  
Roberto Cesar Betini (PPGCA-UTFPR)

Conceito: .....

BELÉM – PA  
2014

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por todas as oportunidades.

Agradeço e dedico a minha família, que sempre me apoio em todas as minhas decisões, em especial aos meus avôs maternos por nunca terem medido esforços a me ajudarem, a minha mãe e meu irmão que sempre fizeram de tudo para me ajudar a alcançar meus objetivos. Meu muito obrigado ao meu Tio Marciano que sempre me ajudou como um pai.

Agradeço ao meu grande Amor, Thomas, pelo carinho e apoio em todos os momentos difíceis que passei, obrigada por sempre está ao meu lado me dando forças e me ajudando a enfrentar e vencer todas os obstáculos.

À UFPA, agradeço por essa oportunidade.

À Eletronorte, agradeço por todo apoio e atenção de seus funcionários em ajudar o desenvolvimento da minha pesquisa.

A todos os meus amigos, e ao grupo de pesquisa.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Morais da Silveira e à minha co-orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Terezinha Ferreira de Oliveira.

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Descrição do Problema.....	3
1.2. Objetivo Geral .....	3
1.3. Objetivos Específicos .....	3
1.4. Contribuição da Pesquisa .....	4
1.5. Metodologia .....	4
1.6. Organização da Dissertação .....	5
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....</b>	<b>6</b>
2.1. Transformadores de Potência .....	6
2.2. Manutenções em Transformadores de Potência.....	8
2.3. Diagnósticos de Falhas em Transformadores.....	9
2.3.1. Tipos de falhas em Transformadores.....	10
2.3.1.1. Falhas Elétricas .....	10
2.3.1.2. Falhas Térmicas .....	11
2.3.2. Gases normalmente encontrados dissolvidos no óleo isolante .....	11
2.3.3. Fatores físico-químicos.....	12
2.3.4. Análise de Gás Dissolvido ou Cromatografia Gasosa.....	13
2.4. Métodos tradicionais de análise de gases dissolvidos.....	14
2.4.1. Método dos gases-chave .....	14
2.4.2. Método das Razões de Dörnenburg.....	15
2.4.3. Método das Razões de Rogers .....	16
2.4.4. Método NBR 7274.....	18
2.5. Ferramentas para diagnóstico de falhas a partir dos critérios AGD.....	20
2.5.1. Propostas usando Lógica <i>Fuzzy</i> .....	21
2.5.2. Propostas usando Redes Neurais .....	22
2.5.3. Programação Genética .....	22

<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
3.1. Área de Estudo .....	24
3.2. Lógica <i>Fuzzy</i> .....	25
3.2.1. Histórico .....	26
3.2.2. Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	27
3.2.3. Variáveis Linguísticas .....	28
3.2.4. Operações com Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	29
3.2.5. Regras <i>Fuzzy</i> .....	29
3.2.6. Estrutura de um Sistema <i>Fuzzy</i> .....	29
3.2.6.1. Fuzzificador .....	30
3.2.6.2. Base de Regras <i>Fuzzy</i> .....	30
3.2.6.3. Inferência <i>Fuzzy</i> .....	31
3.2.6.4. Defuzzificador .....	31
3.3. Análise Fatorial .....	32
<b>4. SOLUÇÃO PROPOSTA.....</b>	<b>35</b>
4.1. Análise Fatorial dos dados .....	35
4.2. Análise de Gases Dissolvidos no óleo isolante .....	37
4.3. Solução <i>Fuzzy</i> proposta.....	37
<b>5. VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características construtivas de um transformador de potência.....	6
Figura 2 - Transformadores de Potência. ....	8
Figura 3- Mapeamento do Processo de Diagnostico de Transformadores na Eletronorte .....	25
Figura 4 - Valores Crisp (a) e Valores Fuzzy (b). ....	26
Figura 5 - Funções de pertinência para a variável umidade. ....	28
Figura 6 - Estrutura de um Sistema Fuzzy. ....	30
Figura 7 - Defuzzificação por Centroide .....	32
Figura 8- Estrutura do sistema proposto .....	37
Figura 9 - Modelo de Funcionamento do Módulo <i>Fuzzy</i> 1.....	38
Figura 10 - Variáveis de entrada e saída do módulo <i>Fuzzy</i> 1. ....	38
Figura 11 - Regras de Produção do Módulo Fuzzy 1 .....	39
Figura 12 - Representação de uma Saída do Módulo <i>Fuzzy</i> 1.....	40
Figura 13 - Modelo de Funcionamento do Módulo Fuzzy 2 .....	40
Figura 14 - Variáveis de Entrada e Saída do Módulo <i>Fuzzy</i> 2.....	41
Figura 15- Regras de Produção do Módulo <i>Fuzzy</i> 2 .....	43
Figura 16 - Representação de uma Saída do Módulo <i>Fuzzy</i> 2.....	44
Figura 17 - Simulação 01 - <i>Fuzzy</i> + <i>Fuzzy</i> 2.....	45
Figura 18 - Simulação 02 - <i>Fuzzy</i> + <i>Fuzzy</i> 2.....	46
Figura 19 - -- Simulação 03 - <i>Fuzzy</i> + <i>Fuzzy</i> 2. ....	46
Figura 20 - Simulação 04 - <i>Fuzzy</i> + <i>Fuzzy</i> 2.....	47
Figura 21 - Simulação 05 - <i>Fuzzy</i> + <i>Fuzzy</i> 2.....	47

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Fatores do Sistema de Medição de Potência..... 36

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Gases normalmente encontrados no óleo.....	12
Quadro 2 - Gases-chave e suas causas. ....	15
Quadro 3 - Método das Razões de Dörnenburg .....	15
Quadro 4 - Concentração de gases para validação do Método das Razões de Dörnenburg.....	16
Quadro 5 - Definição dos códigos do Método de Rogers.....	17
Quadro 6 - Diagnóstico do Método de Rogers em função do código. ....	18
Quadro 7 - Relação dos Códigos – NBR 7274.....	19
Quadro 8 - Diagnósticos indicados pela NBR 7274.....	19
Quadro 9 - Relação dos Códigos não contemplados na NBR7274. ....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AGD	Análise de Gases Dissolvidos
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetileno
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etano
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
FCMAC	Fuzzy CMAC Neural Network
GC	Cromatografia Gasosa
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
IEC 599/78	Interpretation of the Analysis of the Gases in Transformer and Other Oil-Filled Electrical Equipment in Service
IEEE	Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment
LABORELEC	Laboratoire Belge de L'Industrie Électrique
LCIE	Laboratoire Central des Industries Électriques
NBR7274	Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço
OMI	Óleo Mineral Isolante
PREDITRAFO	Sistema Inteligente de Manutenção Preditiva de Transformadores de Potência
SADTRAFOS	Sistema de Apoio à Decisão
SEPs	Sistemas Elétricos de Potência
SIF	Sistema de Inferência Fuzzy
TDCG	Total de Gases Combustíveis Dissolvidos

## RESUMO

Transformadores de potência que utilizam óleo para a isolação de suas partes internas necessitam de um programa de manutenção periódico que vise detectar possíveis falhas, tais como: deterioração da celulose do isolamento dos enrolamentos, curto circuito entre espiras, gases dissolvidos no óleo devido a sua degeneração, etc. Normalmente, programas de manutenção preventiva têm sido utilizados por empresas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica buscando evitar que estas falhas venham a provocar a retirada do equipamento do sistema elétrico, situação que implica em grandes perdas financeiras, seja pela diminuição do faturamento, pelo pagamento de multas à agência reguladora, além da diminuição da confiabilidade do sistema. Para evitar estes tipos de perdas, este trabalho apresenta uma proposta de solução, usando abordagem *Fuzzy*, para auxiliar o processo de programação de inspeções em transformadores de alta potência (500kv), por meio da análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, obtidos pela técnica da cromatografia gasosa e da análise físico-química do óleo. Buscou-se produzir uma solução que combine os resultados dos métodos tradicionais já consolidados na literatura, com situações adicionais oriundas da análise físico-química do óleo e do conhecimento dos especialistas, de forma a aumentar a eficácia do procedimento de inspeção desses equipamentos. Com isso, qualquer Sistema Elétrico de Potência – SEP – que realiza diagnósticos em transformadores por meio da Norma NBR 7274, tende a obter um diagnóstico mais preciso, em decorrência da associação da análise físico-química do óleo isolante com a cromatografia gasosa e o conhecimento tácito de especialistas da área, possibilitando a expansão da base de regras original da referida norma técnica. Todos os testes e a base de dados utilizada são oriundos de um laboratório de Química de várias subestações elétricas de uma concessionária de energia elétrica localizada em Barcarena – Pará – Brasil.

Palavras-chave: Transformadores de Potência. Programação de Inspeção. Abordagem *Fuzzy*. Cromatografia Gasosa. Análise físico-química do óleo isolante.

## ABSTRACT

Power transformers using oil for insulation internal parts need periodic maintenance of a program aimed at detecting possible failures, such as deterioration of the winding insulation cellulose, short circuit between turns, gases dissolved in the oil due to its degeneration etc. Typically, preventive maintenance programs are used by companies for generation, transmission and distribution of electricity for avoiding these failures may result in removal of equipment from the electrical system, a situation that involves large financial losses, either by decreased billing at payment of penalties to the regulatory agency, as well as reduced system reliability. To avoid these types of losses, this paper presents a proposed solution using fuzzy approach, to assist the process of inspections programming in high power transformers (500kv), through the analysis of gases dissolved in insulating oil, obtained by the technique gas chromatography and physico-chemical analysis of the oil. We attempted to produce a solution that combines the results of traditional methods already established in the literature, with additional situations originating from the physico-chemical analysis of the oil and knowledge of experts in order to increase the effectiveness of such equipment inspection procedure. With this, any Electric Power System - SEP - that performs diagnostics on transformers by NBR 7274, tends to get a more accurate diagnosis, due to the association of physical-chemical analysis of the insulating oil with gas chromatography and knowledge tacit from specialists, enabling us to expand the base of original rules of that technical standard. All tests and the database used were from a laboratory of Chemistry of various electrical substations of an power company located in Barcarena - Pará - Brazil.

**Keywords:** Power transformers, Inspections programming, Fuzzy approach, Gas chromatography, Physico-chemical analysis of the oil.

# 1. INTRODUÇÃO

O setor de energia elétrica é de fundamental importância para a sociedade, pois tanto as empresas quanto o cidadão dependem do pleno funcionamento dos Sistemas Elétricos de Potência – SEP. Dentre os diversos componentes da infraestrutura de um SEP, o transformador é um equipamento de extrema importância, pelo fato de ser o mais caro e crítico e demandar um grande esforço para ter sua integridade operacional garantida ao longo do seu ciclo de vida útil. Uma falha que venha a ocorrer, como superaquecimento, arco elétrico ou descargas parciais, poderá ocasionar a retirada do equipamento, causar danos financeiros, econômicos, políticos, e, principalmente, a falta de energia que pode resultar em apagões, com significativo ônus pelo pagamento de grandes multas por parte da empresa responsável pelo equipamento (AQUINO et al, 2011).

Durante a operacionalidade, os transformadores estão sujeitos a esforços de ordem térmica, elétrica e mecânica que, dependendo da energia associada a tais solicitações, podem implicar na formação de determinados gases dissolvidos no óleo mineral isolante, que afetam diretamente as propriedades dielétricas de toda a sua isolação. Durante a operação, esses equipamentos são submetidos a esforços que, somados ao seu processo de envelhecimento natural, deterioram o óleo isolante e podem alterar o funcionamento do transformador e causar falhas (LIMA et al, 2006). Portanto, avaliar a condição operativa de um transformador de potência, bem como a possibilidade da evolução de falhas, significa, em grande parte, monitorar e avaliar as condições de sua isolação sólida e líquida.

O guia IEEE<sup>1</sup> – *Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment* – indica a existência de diversos testes que podem ser aplicados ao óleo isolante, tais como: Rigidez Dielétrica, Fator de Potência e Tensão Interfacial. Para cada equipamento, são obtidos estes dados como resultados dos ensaios Físico-Químicos. Com o advento da Análise de Gases Dissolvidos em óleo – AGD – por meio de Cromatografia Gasosa – CG – na década de 1960, foi dado um grande passo para o diagnóstico de possíveis falhas em transformadores de potência, possibilitando novas abordagens de monitoramento.

Os benefícios do monitoramento incluem: reduções dos custos de manutenção; minoram a probabilidade de falhas destrutivas; e, auxiliam o especialista de manutenção no planejamento do programa de manutenção. Entre os métodos existentes de identificação das

---

<sup>1</sup> IEEE Std C57.106. *Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment*. Disponível em: <search.library.wisc.edu/catalog/ocm52079099>. Acesso em: 12 de Novembro de 2012.

falhas em incipientes, a AGD é um método amplamente aplicado por concessionárias e pesquisadores (DUVAL, 1989). Amostragem e análise do óleo isolante de transformadores, as relações específicas das concentrações de gás, taxas de geração e o total dos gases combustíveis, são frequentemente utilizados como características de classificação por diversas abordagens de AGD.

Alguns estudos indicam que o efeito corona (descargas elétricas no enrolamento), sobreaquecimento (sobrecarga do transformador) e arco elétrico, são as três principais causas de degradação no sistema de isolamento de um transformador de potência. Os gases produzidos durante estes eventos incluem hidrogênio ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), etano ( $C_2H_6$ ), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (WANG, M. H., 2003).

Atualmente, há várias ferramentas para monitoramento e diagnóstico das condições de Transformadores de Potência imersos a óleo e, muitas estão sendo desenvolvidas para aumentar a precisão do diagnóstico (NASCIMENTO JÚNIOR, 2010). Os recentes avanços na modelagem por meio das técnicas da inteligência computacional e processadores mais potentes, têm permitido o funcionamento de numerosas aplicações de monitoramento em Sistemas Elétricos de Potência. Nesse contexto, várias pesquisas continuam sendo desenvolvidas utilizando as técnicas da inteligência computacional na análise de falhas em Transformadores de Potência e diagnóstico de sistemas (HELL, 2002).

Na revisão da literatura, observou-se que na maioria das propostas de sistemas inteligentes com o objetivo de realizar diagnósticos em transformadores de potência, os dados coletados passam por uma etapa de pré-processamento, com o intuito de limpá-los, retirando os dados incompletos ou inconsistentes e preenchendo lacunas encontradas. Por exemplo, no trabalho do Nascimento Júnior (2010), os valores inexistentes em qualquer período de tempo foram preenchidos com o valor médio dos dados disponíveis. Neste trabalho, além da limpeza dos dados, foi realizada uma análise multivariada e fatorial, buscando identificar possíveis correlações entre os gases e os fatores físico-químicos.

O constante monitoramento dos transformadores é uma tarefa essencial para uma correta avaliação de seus estados operativos, aumentando a confiabilidade do SEP, com impactos positivos na redução dos custos de operação. Portanto, o presente trabalho visa apresentar um método de diagnóstico preventivo para falhas em transformadores de alta potência, combinando as técnicas de Cromatografia Gasosa, Análise Fatorial e Análise Físico-química com a da Inteligência Computacional, mais especificamente, a lógica *Fuzzy*.



## 1.1. Descrição do Problema

Energia elétrica confiável e racional é um tema de significativa importância para as sociedades contemporâneas e, por conseguinte, vem sendo pesquisado com muita intensidade pela comunidade científica, uma vez que buscar alcançar o melhor desempenho possível do SEP e dos equipamentos e dispositivos a ele agregados, são esforços fundamentais rumo à eficácia da disponibilização dos serviços de energia elétrica para a sociedade. Nesse contexto, um dos equipamentos de fundamental importância desse conjunto são os transformadores, uma vez que as condições operativas do sistema podem ser altamente influenciadas por variações no comportamento deles (NASCIMENTO JÚNIOR, 2010).

Desse modo, o constante monitoramento dos transformadores torna-se essencial para uma correta avaliação do seu estado operativo. Assim, propostas utilizando novas abordagens e tecnologias avançadas da área da computação são fundamentais para o processo de otimização da solução desse importante problema. Em sintonia com esse propósito, este trabalho propõe um método inteligente, utilizando lógica *Fuzzy*, para geração de alertas de possíveis falhas em transformadores.

## 1.2. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é propor uma solução para programação de inspeções em transformadores de potência, baseado na análise dos gases combustíveis e nos parâmetros físico-químicos do óleo isolante, por meio da Análise de Gases Dissolvidos no óleo isolante, utilizando a técnica da Cromatografia Gasosa, a análise físico-química do óleo, técnicas estatísticas e abordagem fuzzy.

## 1.3. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos compreendem:

- 1) Análise estatística e exploratória dos dados;
- 2) Utilização da Cromatografia Gasosa para análise de falhas.
- 3) Análise Físico-Química para verificar possíveis correlações entre as condições metroológicas da coleta de gases e o teor destes, bem como, entre os parâmetros físico-químicos dos gases;

5) Adquirir o conhecimento tácito dos especialistas para situações não previstas pela NBR 7274 para possibilitar a especificação de regras necessárias para a implementação da proposta de solução do problema;

5) Propor uma solução com lógica *Fuzzy*, a partir da análise estatística dos dados, para geração de alertas de inspeção sobre possíveis falhas nos transformadores.

#### **1.4. Contribuição da Pesquisa**

A contribuição deste trabalho foi o resultado apresentado pela Análise Fatorial, mostrando a relação existente entre os fatores físico-químicos e os gases, normalmente tratados de forma isolada nos trabalhos pesquisados. A partir dessa percepção, foi possível utilizar a relação dessas variáveis nos sistemas *Fuzzy* propostos.

Assim, por meio de vários relatórios de diagnósticos realizados por especialistas do SEP estudado (Eletronorte), foi possível perceber que, para as combinações não contempladas pela norma NBR 7274 (verificar no Quadro 8 encontrada no capítulo 2), era dado um diagnóstico baseado em experiências anteriores. A partir disso, foi possível propor uma solução *Fuzzy* que contempla todas as possíveis combinações dos gases (visto no Quadro 9 no capítulo 4) e, com isso, agregar valor ao diagnóstico das falhas.

#### **1.5. Metodologia**

A metodologia utilizada para realização deste trabalho foi constituída das seguintes etapas: a primeira etapa compreendeu verificar o Estado da Arte sobre o tema. Nesta etapa, foram estudadas as normas nacionais e internacionais que a concessionária de energia estudada utiliza em seu laboratório para o procedimento de ensaios e indicativos de falhas em transformadores, bem como a literatura técnica específica sobre métodos de diagnóstico de falhas em transformadores.

Na segunda etapa, teve-se acesso ao banco de dados do laboratório de ensaios químicos da Eletronorte. Com os dados obtidos pela técnica da cromatografia gasosa e pela análise físico-química do óleo, foi aplicado a técnica de mineração de dados para realizar uma limpeza nos dados, por meio de um pré-processamento, para a exclusão de informações inconsistentes.

Na terceira etapa, após os dados pré-processados, foi realizada uma análise estatística na base de dados, por meio da análise fatorial, buscando identificar possíveis correlações entre os dados da análise dos gases com os da análise físico-química do óleo isolante.

Na quarta etapa foi construída a solução computacional de apoio ao método proposto, constituída de dois módulos *Fuzzy*. O primeiro, utilizando o conhecimento resultante da análise fatorial dos dados e o segundo, o conhecimento sobre os dados da Análise de Gases Dissolvidos em óleo isolante. A base de regras da solução proposta foi customizada, buscando uma melhor aproximação dos reais resultados do diagnóstico do equipamento.

A quinta etapa compreendeu a validação do método proposto. Nos testes de validação foram utilizados dados reais, obtidos de uma subestação da região amazônica, no período de 2001 a 2006. Os resultados foram validados com os especialistas da área da referida companhia.

## **1.6. Organização da Dissertação**

A presente dissertação está organizada em 4 capítulos com os assuntos assim distribuídos:

O capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre trabalhos relevantes na área, demonstrando conceitos importantes para entendimento da estrutura do trabalho, no contexto da avaliação do estado do isolamento do transformador, por meio do monitoramento das suas propriedades. O capítulo aborda também a importância desses equipamentos nos SEPs e o “Estado da Arte” das soluções atualmente disponíveis para a solução desse problema.

O capítulo 2 apresenta, de forma detalhada, os materiais utilizados para a composição do trabalho e os conceitos dos métodos utilizados para compor o resultado da solução proposta.

O capítulo 3 apresenta a solução proposta, compreendendo o processo da análise estatística dos dados sobre os gases dissolvidos e os parâmetros físico-químicos do óleo isolante dos transformadores, e, o sistema *Fuzzy* construído a partir do conhecimento adquirido dos especialistas e dos resultados da análise estatística.

O capítulo 4 apresenta os resultados da simulação da solução proposta que foram utilizados para validação da presente proposta

Por fim, apresenta a conclusão e as considerações finais do trabalho e proposições de possíveis trabalhos futuros sobre este importante tema.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre trabalhos relevantes na área, demonstrando conceitos importantes para entendermos a estrutura do trabalho dentro do problema da avaliação do estado do isolamento do transformador por meio do monitoramento das suas condições.

### 2.1. Transformadores de Potência

Transformadores de Potência são equipamentos cujo princípio básico de funcionamento se dá a partir da conversão de diferentes níveis de tensão entre a fonte, ligada ao primário, e a carga alimentada, ligada ao secundário. Podem ser trifásicos ou monofásicos, dependendo das necessidades específicas de cada instalação. No sistema elétrico, há diferentes tipos de transformadores que possuem características específicas quanto à classe de tensão e potência. Os transformadores são formados por buchas de alta e baixa tensão, radiadores ou trocadores de calor, tanque principal, tanque de expansão, painéis de controle e outros dispositivos. Essencialmente, são equipamentos mais complexos, conforme ilustrado na Figura 1, que dependem da interação de diversos componentes para o seu perfeito funcionamento.

**Figura 1** - Características construtivas de um transformador de potência.



Em que: 1 – Núcleo. 2 – Enrolamentos. 3 – Tanque Principal. 4 – Tanque de expansão de óleo. 5 – Buchas. 6 – Comutador sob carga. 7 – Acionamento do comutador sob carga. 8 – Radiadores/Trocadores de calor. 9 – Painel de controle. 10 – Secador de ar. 11 – Termômetros

Fonte: ABB – CATÁLOGO TÉCNICO (1999, p. 7).

O transformador de potência foi criado entre o final do século XIX e início do século XX, quando Nicola Tesla apresentou os sistemas elétricos polifásicos, e Thomas Alva Edison inventou a lâmpada elétrica. Logo, trata-se de um equipamento que, com um pouco mais de cem anos de existência, viabilizou a aplicação da eletricidade em todo o mundo (MARQUES, 2004). Antes da existência dos transformadores, a energia elétrica era distribuída em baixa tensão e em corrente contínua a poucos consumidores, os quais deveriam estar instalados forçosamente próximos à geração, pois os alimentadores de energia não podiam ser longos devido às quedas de tensão e às perdas de energia nos condutores elétricos. Assim, os primeiros transformadores eram equipamentos de baixo rendimento e apresentavam perdas relativamente elevadas. Porém, com as novas tecnologias, foram desenvolvidos equipamentos eficientes e com alto rendimento.

A família de transformadores de potência, ilustrada na Figura 1, pode ser descrita, de forma simplificada, como equipamentos elétricos estacionários para uso em sistemas, cuja função é a transferência de energia elétrica de um circuito primário para um circuito secundário, mantendo a mesma frequência do sinal alternado, adequando os valores de corrente e tensão. Esta transferência ou transformação de energia não envolve partes mecânicas móveis e, teoricamente, um transformador poderia operar continuamente sem sofrer qualquer tipo de desgaste mecânico, se não fosse submetido a esforços e a desgastes.

Ultimamente, a concorrência entre as empresas está cada vez mais acentuada, pois o mercado exige máxima eficiência. No caso de empresas do setor de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, esta regra não é diferente, de maneira que é fundamental diminuir o risco de panes nos equipamentos e, conseqüentemente, o risco de racionamentos de energia.

Nos Transformadores de Potência é utilizada uma grande quantidade de óleo mineral isolante derivado do petróleo, formado por uma mistura de hidrocarbonetos, processados através de uma rigorosa purificação, para retirada de contaminantes, principalmente o enxofre. Eles são estáveis e possuem baixa viscosidade, pois, além de sua função dielétrica de impregnação, atuam também como meios refrigerantes para transportar o calor gerado na

parte ativa do transformador para a região mais periférica e para os radiadores (BECHARA, 2010).

As características ideais para um dielétrico líquido a ser utilizado em transformadores de potência, decorrem das funções que lhe são exigidas, como elevada rigidez dielétrica, baixo fator de dissipação dielétrica, elevado coeficiente de transmissão térmica, baixa viscosidade, alto ponto de rigidez, elevado ponto de fulgor e baixo custo.

## 2.2. Manutenções em Transformadores de Potência

As concessionárias de energia elétrica, por meio dos seus departamentos de manutenção, fazem monitoramentos e diagnósticos dos Transformadores de Potência de seus Sistemas Elétricos de Potência, de modo a prevenir ou antecipar desligamentos indesejados. As atividades de manutenção permitem a detecção prévia de defeitos nos transformadores e seus acessórios, antes que possam comprometer o bom desempenho desses equipamentos. A Figura 2 mostra um transformador de potência de grande porte como os considerados nesta pesquisa.

**Figura 2 - Transformadores de Potência.**



Fonte: Catálogo Siemens do Brasil. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br>>. Acesso em: 1º set. 2013.

Por muitos anos, os programas de manutenção preventiva em transformadores consistiram em inspeções, testes e ações periódicas, em intervalos de tempo, normalmente sugeridos pelo fabricante ou determinados pela experiência prática. Essa manutenção baseada

no tempo evitou muitas falhas, mas também causou desligamentos desnecessários, com desperdício de recursos humanos e financeiros.

A confiabilidade nos equipamentos de proteção do sistema elétrico tem aumentado significadamente. Este fato tem várias origens, dentre as quais se destaca de um lado, o conhecimento mais aprofundado do fenômeno da interrupção do arco elétrico e, por outro lado, a melhoria na concepção construtiva com uma redução do número de peças e um aumento da qualidade na fabricação. Mas, mesmo diante dos avanços alcançados, esta confiabilidade ainda não atende aos critérios de segurança de funcionamento requisitados pelos usuários, pois, com o elevado número de equipamentos instalados, a ocorrência de falhas tem se tornado inevitável, contudo, frequentemente, podem ser detectadas a tempo e reparadas antes da ocorrência de um dano maior (BECHARA, 2010).

As técnicas de manutenção disponíveis permitem a oferta de soluções eficientes para minorar os problemas de funcionamento dos equipamentos, aumentando a vida útil e reduzindo a quantidade de falhas e defeitos. Dentre as técnicas de manutenção disponíveis, pode-se destacar: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Técnica Preditiva.

### **2.3. Diagnósticos de Falhas em Transformadores**

Neste trabalho, considera-se “defeito” aquele estado que, em curto ou médio prazo, levaria um equipamento a falhar, caso não ocorra a intervenção corretiva no mesmo. Em outras palavras, “defeito” é uma anomalia em um equipamento que pode levá-lo a funcionar de forma irregular e/ou além de sua capacidade nominal, de modo que se não for corrigido a tempo, pode falhar e, conseqüentemente, ser retirado de serviço. Por outro lado, considera-se “falha” uma anomalia em um equipamento que o leva forçadamente à interrupção de funcionamento, retirando-o obrigatoriamente de serviço (LAPWORTH, 2006).

Durante a operação de um transformador, o óleo isolante e outros materiais dielétricos sofrem, sob a ação de temperatura e de tensões elétricas, processos de decomposição química que resultam na produção de gases. A ocorrência de falhas, tais como superaquecimento, arco ou descargas parciais, resultam na produção de quantidades consideráveis de gases, tradicionalmente utilizados para acionar o relê Buchholz, que atua como alarme e proteção dos transformadores (HELL, 2002). Os gases formados pela decomposição dos materiais isolantes são total ou parcialmente dissolvidos no óleo, sendo diluídos e transportados de todos os pontos. Isto possibilita, através da coleta de uma amostra, a obtenção de informações de todas as partes em contato com o óleo.

Nos programas de manutenção preventiva em transformadores incluem-se: os testes de rotina, que são definidos pelos SEPs e a execução de serviços como medição de perdas dielétricas; de resistência de isolamento e enrolamentos; análise físico-química e cromatográfica do óleo; monitoramento manual ou automático da temperatura e do carregamento; tratamento, troca ou a regeneração do óleo isolante; limpeza dos terminais, entre outros (COSTA & BRANDÃO JÚNIOR, 2009).

O advento das técnicas de análise de gás, dentre as quais se destaca a cromatografia, capazes de processar pequenas amostras com grande sensibilidade e precisão, tornou possível um novo enfoque para o problema. No caso da ocorrência de uma falha incipiente, as quantidades de gases gerados são pequenas, estes gases dissolvem-se no óleo, podendo não ser detectados na amostra examinada. A extração e análise de uma amostra do óleo isolante constituem, no entanto, um instrumento poderoso para a identificação precoce de uma falha. Esse método desenvolvido é largamente utilizado em todo o mundo, permitindo um diagnóstico das condições internas de um transformador (CASS; DEGANI, 2001).

### **2.3.1. Tipos de falhas em Transformadores**

Os tipos de falhas em Transformadores de Potência podem ser divididos em dois grupos: Falhas de Origem Elétrica e Falhas de Origem Térmica (BECHARA, 2010).

#### **2.3.1.1. Falhas Elétricas**

**a) Descargas parciais de baixa intensidade:** aparecem devido à baixa eficiência dos materiais isolantes ou à existência de gás na isolação. Esta falha não gera sinais visíveis de deterioração dos materiais envolvidos.

**b) Descargas parciais de alta intensidade:** aparecem devido à baixa eficiência dos materiais isolantes, à existência de gás na isolação. Diferentemente das descargas parciais de baixa intensidade, esta falha gera sinais visíveis de deterioração dos materiais envolvidos.

**c) Descargas de baixa energia:** ocorrem com o mau contato de conexões de potenciais, faiscamento em rupturas de condutores ou descargas descontinuadas em contatos de seletores de comutação de tensão, devido às rugosidades nas superfícies dos contatos, geradas pelo continuado processo de comutação sobrecarga.

**d) Descargas de alta energia:** ocorrem devido aos curtos-circuitos internos dos enrolamentos, curto-circuito em conexões de potenciais contra terra ou descargas entre condutores não isolados.



### 2.3.1.2. Falhas Térmicas

a) **Sobreaquecimento de 150°C até no máximo 300°C:** surge devido ao sobreaquecimento dos enrolamentos ou pontos quentes no núcleo, ocasionado por perdas excessivas de magnetização, refrigeração insuficiente ou sobrecargas.

b) **Sobreaquecimento local de 300°C até no máximo 1000°C:** ocorre devido às correntes circulantes (correntes de Foucault) no núcleo, no tanque, na armação ou ainda devido ao mau contato em seletores de tensão, devido às rugosidades nas superfícies dos contatos, geradas pelo continuado processo de comutação sobrecarga, com carbonização do óleo isolante.

c) **Sobreaquecimento local acima de 1000°C:** ocasionado por curto-circuito interlaminares no núcleo, com pontos de fusão ou condutores fundidos e pontos metálicos com início de fusão.

### 2.3.2. Gases normalmente encontrados dissolvidos no óleo isolante

A detecção de certos gases gerados no óleo isolante do transformador em serviço é frequentemente a primeira indicação de seu mau funcionamento. Descargas de baixa energia, de alta energia e sobreaquecimento, são alguns dos mecanismos de falha que podem ser identificados através desta análise. A ocorrência destes eventos pode resultar na decomposição dos materiais isolantes e, conseqüente, na formação de vários gases combustíveis e não combustíveis. A operação de transformadores com grande quantidade de gases combustíveis, não é uma condição normal, mas pode acontecer, desde que investigados e avaliados os possíveis riscos desta operação (IEEE C57.104-1991<sup>2</sup>). Segundo a norma IEEE Std C57.104-1991, os gases normalmente encontrados dissolvidos no óleo isolante são os listados na Quadro 1.

---

<sup>2</sup> Disponível em:

<[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=182866&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D182866](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=182866&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D182866)>. Acesso em: 16 fev. 2012.

Quadro 1 - Gases normalmente encontrados no óleo.

NOME DO GÁS	SÍMBOLO	INDICA
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	Grandes quantidades são relacionadas ao efeito corona. É também resultante da decomposição térmica do óleo.
Oxigênio	O <sub>2</sub>	
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	
Monóxido de Carbono	CO	Produzidos pelo envelhecimento térmico do papel.
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	
Metano	CH <sub>4</sub>	São resultantes da decomposição térmica do óleo.
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Associados aos arcos elétricos no óleo.
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	

Fonte: Duval (2002).

### 2.3.3. Fatores físico-químicos

A técnica de análise físico-química determina a condição de isolamento e o estado de envelhecimento do óleo mineral isolante, a partir de uma coleta da amostra de óleo mineral isolante no transformador em serviço, levado para análise em laboratório. Os laboratórios realizam ensaios fundamentais para diagnosticar a qualidade do óleo mineral isolante, com agilidade e precisão necessária, dando subsídios confiáveis às empresas para programar e planejar uma parada para manutenção nos equipamentos. Os resultados obtidos em laboratório são comparados aos valores pré-estabelecidos em normas. Os valores fora dos limites especificados indicam a necessidade de tratamento, de substituição ou de regeneração do óleo mineral (MORAIS, 2004).

As principais características físico-químicas ou ensaios utilizados como parâmetros de classificação do óleo isolante são: **a) cor:** um rápido aumento da cor indica deterioração ou contaminação do óleo; **b) rigidez dielétrica:** serve para medir a capacidade de um óleo suportar tensões elétricas e indicar a presença de contaminantes como água e partículas condutoras; **c) teor de água:** um elevado teor de água acelera a deterioração química do papel

isolante e é indicativo de condições de operações indesejáveis, que requerem correções; **d) acidez:** indica que o óleo contém qualquer material ácido que, além de aumentar a oxidação do óleo e formar borras, pode também promover a degradação do papel; **e) tensão interfacial:** indica a presença de contaminantes polares, que são substâncias quimicamente ativas que aceleraram o envelhecimento do óleo.

Algumas das características supracitadas servem não somente como parâmetros de projeto de isolamento, mas também na avaliação e no acompanhamento do óleo em serviço, indicando possível contaminação, estimativas de deterioração ou determinação das condições funcionais (SOUZA, 2008).

#### **2.3.4. Análise de Gás Dissolvido ou Cromatografia Gasosa**

A Análise de Gás Dissolvido – AGD – também conhecida como Cromatografia em Fase Gasosa, pode ser definida como um método físico de separação através do qual os componentes a serem separados são distribuídos entre duas fases: uma estacionária, de grande área superficial; e, outra, um fluido que circula através da primeira. A análise cromatográfica dos gases dissolvidos em óleo isolante é um instrumento muito eficiente na determinação de falhas incipientes e para simples monitoração do equipamento, sem ocorrer interrupções no fornecimento de energia (AGORIS, et al, 2007; CELG, 1992; OLIVEIRA, 2004).

A AGD determina a condição operacional dos transformadores a partir das concentrações destes gases, de suas taxas de geração e da concentração total de gases combustíveis no óleo. Sobreaquecimento, descarga parcial de baixa energia e descarga de alta energia são as três causas primárias associadas aos diversos tipos de falhas.

A formação de gases em equipamentos elétricos imersos em óleo mineral isolante pode ocorrer devido ao processo de envelhecimento natural e/ou, em maior quantidade, na formação de gases, resultando, assim, numa falha no equipamento, ainda que seja em fase incipiente. Deste modo, a análise ocorre quando o fluido, no qual estão contidos os componentes a serem separados, passa através de uma fase estacionária ou de um meio onde estes componentes possam interagir. Caso as interações dos diversos componentes com o meio sejam diferentes entre si, as velocidades de percurso dos componentes através do meio serão também diferentes e, portanto, serão separados. Em consequência, os componentes com as interações mais fracas serão separados com maior rapidez que aqueles cujas interações são mais fortes (CELG, 1992).

A cromatografia em fase gasosa emprega como fase móvel um gás quimicamente inerte em relação à fase estacionária e em relação aos constituintes das misturas analisadas

que passam continuamente por sobre a fase fixa. Dessa forma, uma pequena quantidade de amostra é introduzida no fluxo de fase móvel no início da coluna. As interações dos componentes da amostra com a fase estacionária, sendo reversíveis e diferentes, fazem com que estes sofram pequenos retardamentos diferenciados para cada um, ocorrendo, assim, a separação necessária. No final da coluna, há um detector por onde passa continuamente o gás de arraste. Quando sai da coluna com alguma substância, o detector detecta o gás de arraste com a substância (OLIVEIRA, 2004).

## **2.4. Métodos tradicionais de análise de gases dissolvidos**

Durante os anos surgiram diversos estudos sobre a formação de gases em isolamentos de transformadores, bem como foram sugeridos e aperfeiçoados diversos métodos de diagnóstico a partir da análise desses gases dissolvidos no óleo. De modo geral, muitas destas publicações ainda são utilizadas e transformaram-se em normas e recomendações. Algumas alterações foram posteriormente sugeridas, no que diz respeito aos valores limites para identificação de falhas e caracterização de condição de normalidade, mas mantiveram-se as bases pré-estabelecidas.

### **2.4.1. Método dos gases-chave**

Este método identifica o gás-chave para cada tipo de falha e utiliza o percentual deste gás para a identificação. A interpretação da Análise de Gases Dissolvidos no óleo é baseada em um conjunto simples de fatos. Por exemplo, as descargas parciais ou produção de corona se devem, principalmente, ao  $H_2$  com alguns traços de gases derivados de hidrocarbonetos, portanto, o gás-chave para descargas parciais ou corona é o  $H_2$ , ou seja, a descarga parcial e a corona podem ser detectadas se o percentual da quantidade de  $H_2$  for bem significativo em uma amostra de óleo (DINIZ; NOGUEIRA; ASSUNÇÃO, 2012).

O diagnóstico através do método dos Gases-chave baseia-se na predominância de determinado gás com relação ao Total de Gases Combustíveis Dissolvidos – TGCD – no óleo isolante. O TGCD é calculado somando-se as concentrações de hidrogênio ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), etano ( $C_2H_6$ ), etileno ( $C_2H_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ) e monóxido de carbono (CO) que se encontram dissolvidos no óleo. Nesse método, as concentrações absolutas (em PPM) e as taxas de geração (em PPM/dia) dos gases são usadas para se determinar o tipo e a intensidade de determinadas falhas (HELL, 2002). Essas falhas estão relacionadas com os Gases-chave, de acordo com a Quadro 2.

**Quadro 2 - Gases-chave e suas causas.**

<b>H<sub>2</sub></b>	Corona (falha elétrica)
<b>CH<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	Degradação do óleo a baixas temperaturas (falha térmica)
<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	Degradação do óleo a altas temperaturas (falha térmica)
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	Arco (falha elétrica)
<b>CO e CO<sub>2</sub></b>	Degradação de isolantes celulósicos (relacionado ao processo de envelhecimento)

#### 2.4.2. Método das Razões de Dörnenburg

Em 1977, Dörnenburg diferenciou falhas térmicas de falhas elétricas, usando quatro razões e seis gases (FALLOU et al, 1970; RANDY, 1977). O método de Dörnenburg utiliza duas relações principais de gases, duas relações auxiliares e seis gases (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). Não estabelece critérios para caracterizar se o isolamento está em condições normais, mas estabelece as condições de validade para a aplicação do método de diagnóstico em função da concentração dos gases componentes das relações (DÖRNENBURG & GERBER, 1997). A Quadro 3 apresenta os dados para análise em função das relações de gases e o diagnóstico previsto.

**Quadro 3 - Método das Razões de Dörnenburg**

Relações entre concentrações de gases	Relações principais		Relações auxiliares	
	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>
Sobreaquecimento local	> 1	< 0.75	> 0.4	< 0.3
Descarga de baixa Intensidade	< 0.1	Não significativo	> 0.4	< 0.3
Outros tipos de descargas	> 0.1 e < 1	>0.75	< 0.4	> 0.3

Fonte: Bozzini et al (1975).

A Quadro 4 apresenta os dados de concentração individual dos gases para verificação da validade de aplicação do Método das Razões de Dörnenburg.

**Quadro 4 - Concentração de gases para validação do Método das Razões de Dörnenburg.**

TIPO DE GÁS	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Concentração PPM (v/v)	200	50	15	60	15

O critério de validade é que se ao menos um dos gases em cada uma das relações apresentadas no Quadro 3 excederem o valor limite do Quadro 4, o Método das Razões de Dörnenburg é válido; caso contrário, as relações não são significantes e o equipamento deve ser reamostrado e investigado por métodos alternativos, tais como: o método de avaliação do transformador usando concentrações individuais, o TGCD e o método de avaliação do possível tipo de falha pelo método dos Gases-chave, descritos em IEEE Std C57. 104- 1991<sup>3</sup>.

#### 2.4.3. Método das Razões de Rogers

O método de Rogers utiliza as relações de concentração de gases e limites de variação destas relações para emitir diagnóstico do equipamento. Este método sofreu várias alterações ao longo do tempo, em função de adaptações realizadas para ajustar a correlação do método com os resultados obtidos. Assim, embora os critérios originais fossem baseados em modelos teóricos aproximados, foram ao longo do tempo sendo adaptados à correlação de resultados de investigações de falha analisadas (KELLY, 1980).

Por estas características, este é um dos métodos mais frequentemente utilizados e parece com variações nos limites empregados e no número de relações de concentração de gases. Os gases envolvidos são CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (ROGERS, 1975). A seguir, no Quadro 5, são apresentados os valores das faixas de variação das relações e em função dos valores obtidos para as relações gasosas é encontrado um código. Através da combinação destes códigos através das relações dos gases, é determinado o diagnóstico da situação de operação encontrada no transformador que é apresentado no Quadro 6.

<sup>3</sup> Disponível em:

<[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=182866&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D182866](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=182866&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D182866)>. Acesso em: 25 nov. 2011.

Quadro 5 - Definição dos códigos do Método de Rogers.

RELAÇÃO DE GASES	FAIXA DE VARIAÇÃO	CÓDIGO
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	$\leq 0.1$	5
	$> 0.1, < 1$	0
	$\geq 1, < 3$	1
	$\geq 3$	2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>	$< 1$	0
	$\geq 1$	1
	$< 1$	0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$\geq 1, < 3$	1
	$\geq 3$	2
	$< 0.5$	0
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$\geq 0.5, < 3$	1
	$\geq 3$	2

**Quadro 6 - Diagnóstico do Método de Rogers em função do código.**

CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	DIAGNÓSTICO
0	0	0	0	Deterioração normal
5	0	0	0	Descargas parciais
1 ou 2	0	0	0	Sobreaquecimento – abaixo de 150°C
1 ou 2	1	0	0	Sobreaquecimento – de 150°C - 200°C
0	1	0	0	Sobreaquecimento de 200 – 300°C
0	0	1	0	Sobreaquecimento de condutores
1	0	1	0	Correntes de circulação nos enrolamentos
1	0	2	0	Correntes de circulação no núcleo e tanque, sobreaquecimento em conexões
0	0	0	1	Descarga descontínua
0	0	1 ou 2	1 ou 2	Arco com alta energia
0	0	2	2	Descarga contínua de baixa potência
5	0	0	1/2	Descarga parcial envolvendo o papel

#### 2.4.4. Método NBR 7274

Este método é baseado na IEC 599/78, é semelhante ao Método de Rogers, variando alguns limites das relações, bem como modificações na interpretação dos valores de cada diagnóstico (ZIRBES; ROLIM; ZÜRN, 2005). A Quadro 9 apresenta a relação dos códigos da NBR 7274 estabelecendo os limites para as relações dos gases e os correspondentes códigos para as razões dos gases.



Quadro 7 - Relação dos Códigos – NBR 7274.

LIMITE DAS RELAÇÕES DOS GASES	RAZÕES DOS GASES E SEUS CÓDIGOS		
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
<0,1	0	1	0
>=0,1...1=<	1	0	0
>1...3=<	1	2	1
>3	0	2	2

A partir da combinação dos códigos apresentados na Quadro 9 acima, chega-se a um diagnóstico final, na Quadro 8 apresenta as interpretações da análise de gases de acordo com a norma NBR 7274.

Quadro 8 - Diagnósticos indicados pela NBR 7274.

RELAÇÃO GASOSA			DIAGNOSTICO	SAÍDA
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (R1)	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (R2)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (R3)		
0	0	0	Envelhecimento Normal	Normal
0	1	0	Descarga Parcial de baixa energia	Falha Elétrica
1	1	0	Descarga Parcial de alta de energia	
1 – 2	0	1 – 2	Descarga de baixa energia	
1	0	2	Descarga de alta energia	
0	0	1	Sobreaquecimento <150°C	Falha Térmica
0	2	0	Sobreaquecimento 150° - 300°C	
0	2	1	Sobreaquecimento 300° - 700°C	
0	2	2	Sobreaquecimento >700°C	

## 2.5. Ferramentas para diagnóstico de falhas a partir dos critérios AGD

Conforme já citado, quando um transformador encontra-se em operação, o óleo isolante e outros materiais dielétricos sofrem, sob a ação de temperatura e de tensões elétricas, processos de decomposição química que resultam na evolução de gases. A ocorrência de falhas, tais como superaquecimento, arco elétrico ou descargas parciais, resultam na produção de quantidades apreciáveis de gases.

O advento das técnicas de análise de gás, dentre as quais se destaca a Cromatografia, capazes de processar pequenas amostras com grande sensibilidade e precisão, tornou possível um novo enfoque para o problema. No caso da ocorrência de uma falha incipiente, as quantidades de gases gerados são pequenas. Estes gases dissolvem-se no óleo, podendo não resultar em uma fase gasosa capaz de ser detectada ou examinada, como anteriormente descrita.

A extração e análise de uma amostra do óleo isolante constituem, no entanto, um instrumento poderoso para a identificação precoce de uma falha. Dentre os métodos para diagnósticos de falhas em transformadores a partir dos critérios AGD, a Cromatografia Gasosa e a Análise Físico-química do óleo, capazes de processar pequenas amostras com grande sensibilidade e precisão, foram os métodos considerados neste estudo.

A análise do óleo isolante pela Cromatografia Gasosa permite obter um diagnóstico eficaz da condição do óleo. Desta forma, diversos métodos de diagnóstico de falhas a partir da Análise de Gases Dissolvidos em óleo isolante de transformadores têm sido desenvolvidos. Além dos quatro métodos tradicionais de Análise de Gases Dissolvidos especificados anteriormente, outras propostas foram formuladas, com destaque para os métodos que utilizam relações e concentrações individuais de gases: do *Laboratoire Central des Industries Électriques* – LCIE; do *Laboratoire Belge de L'Industrie Électrique* – LABORELEC; os métodos envolvendo concentrações individuais de gases, como o trabalho de Duval (2002); e, o método dos Gases-chave indicadores, recomendado pela IEEE C57.104/91.

Com base nos métodos considerados tradicionais, esta seção apresenta alguns trabalhos para diagnóstico de falhas em transformadores de potência, combinando a Análise de Gases Dissolvidos no óleo (AGD) com as técnicas de inteligência computacional, agregando considerável valor rumo à eficácia da solução desse importante problema do setor elétrico.

### 2.5.1. Propostas usando Lógica *Fuzzy*

Teodoro (2009), desenvolveu um sistema utilizando Lógica *Fuzzy*, para detecção e diagnóstico de falhas em transformadores de potência que permite avaliar o estado operativo desse equipamento. As informações monitoradas do transformador e do sistema elétrico são: a) temperatura do óleo isolante; b) nível do óleo; c) analisador de gás dissolvido no óleo; d) temperatura do enrolamento; e) temperatura ambiente e carregamento, que são processadas em tempo real e o resultado é utilizado para apoiar a tomada de decisões.

Os dados de saída desse sistema sinalizam a possibilidade de ocorrência de falha interna do transformador. Caso seja detectado um desvio em relação aos padrões de operação do equipamento, é analisado em maior profundidade para uma avaliação mais precisa de suas causas. Os testes foram feitos usando dados hipotéticos, nos quais o transformador de potência encontra-se em operação normal de funcionamento e as grandezas monitoradas são alteradas, colocando o operador em estado de alerta. Essas informações são processadas pelo sistema de inferência *Fuzzy* na detecção e diagnósticos de falhas, e determina a possibilidade de ocorrência de uma falha. Neste caso, o operador entra apenas em estado de alerta, aguardando a próxima leitura, sem tomar nenhuma atitude corretiva.

Santos, Vellasco, Tanscheit (2010) desenvolveram um Sistema de Apoio à Decisão denominado SADTRAFOS, composto por um módulo de Inteligência Computacional, que utiliza regras *Fuzzy* para estabelecer o diagnóstico da situação operacional do transformador por meio de dados da Análise de Gases Dissolvidos no óleo. O sistema oferece ações e recomendações de manutenção de acordo com o diagnóstico obtido.

O SADTRAFOS utiliza o potencial da Análise de Gases Dissolvidos – AGD – e uma base de conhecimento especificada em Lógica *Fuzzy* – LF –, permitindo bons resultados nos diagnósticos. O sistema é composto por três módulos: 1) Módulo de Pré-processamento; 2) Módulo de Diagnóstico; 3) Módulo de Apoio à Decisão. De acordo com a arquitetura do SADTRAFOS, após a entrada de dados de gases dissolvidos no Óleo Mineral Isolante – OMI – de um dado transformador, o módulo de diagnóstico apresenta o diagnóstico parcial do equipamento através do Sistema de Inferência *Fuzzy* – SIF – e, posteriormente, utiliza o módulo de apoio à decisão para, ao considerar as informações do transformador como o seu projeto e contexto operacional, fornecer um parecer final à gestão da manutenção sobre o equipamento, tornando a decisão final sobre possíveis intervenções, mais segura e objetiva.

Németh et al (2010), apresentaram uma proposta de implementação de um sistema especialista que utiliza Lógica *Fuzzy* combinada com redes neurais para aumentar a precisão na detecção de falhas em transformadores de potência, baseadas na Análise de Gás Dissolvido

em óleo. A proposta utiliza como critérios para classificação do diagnóstico, o IEEE/IEC e National Standard. Este sistema especialista também considera outras informações do transformador, como o nível de tensão, histórico de manutenção, etc.

### **2.5.2. Propostas usando Redes Neurais**

Aquino et al (2011) desenvolveram um *software* chamado PREDITRAFO, para diagnosticar falhas em Transformadores de Potência, através da análise cromatográfica dos óleos isolantes. O *software* desenvolvido neste trabalho usou duas normas, a de Rogers e a IEC 599 para especificar as regras de produção *Fuzzy*. A inferência dessa base de regras permite diagnosticar os prováveis defeitos que podem ocorrer no transformador. Adicionalmente, o PREDITRAFO é capaz de indicar um provável defeito, mesmo quando as relações dos gases não se encontram tabeladas pelas normas. Isso ocorre por aproximação para um ou mais diagnósticos tabelados, já que podem existir falhas simultâneas ocorrendo no transformador.

Yun e Zhao (2010) apresentam um novo método para diagnóstico de falhas em Transformadores de Potência baseado em rede neural *Fuzzy*-CMAC – FCMAC. A proposta da rede neural *Fuzzy*-CMAC apresenta um mecanismo de otimização para garantir alta acurácia do diagnóstico. As funções de base na CMAC originais são substituídas por funções de pertinência da teoria *Fuzzy* para suavizar a saída da rede e aumentar a capacidade de aproximação das funções.

Uma estrutura do FCMAC com funções de pertinência de diferentes campos receptivos foi utilizada. Estes campos receptivos foram determinados pelas distribuições de dados do treino. A rede neural possui 5 (cinco) nós na camada de entrada e 6 (seis) nós na camada de saída, foi testada por grupos de amostras de falhas reais, e os resultados são comparados com os códigos das razões do IEC e da rede neural *Fuzzy*-CMAC, o que indicou que a abordagem da proposta tem uma precisão no diagnóstico notável, e, com ela, várias falhas podem ser classificadas de forma eficaz.

### **2.5.3. Programação Genética**

Lima et al (2006) tratam da análise e implementação de uma metodologia que utiliza um algoritmo evolucionário baseado em Programação Genética para detectar regras em base de dados de transformadores, com a finalidade de predição de falhas incipientes. Neste trabalho, foi desenvolvido um *framework* denominado “MINERA”, para melhorar a capacidade no diagnóstico de falhas utilizando informações sobre os gases dissolvidos no óleo

isolante, e, também, para descoberta de regras em base de dados. Essa ferramenta emprega um algoritmo de Programação Genética modificada que utiliza conceitos da Teoria da Informação, tais como “Entropia” e “Ganho de Informação”. O *framework* também fornece suporte para tirar máximo proveito da arquitetura de processadores com múltiplos núcleos. A ferramenta desenvolvida utiliza base de dados de Cromatografia Gasosa e critérios de diagnóstico já consolidados na literatura. Utiliza ainda uma metodologia evolucionária com a finalidade de identificar o tipo de falha incipiente existente no equipamento.

Atualmente, encontram-se disponíveis ou está em desenvolvimento um considerável número de ferramentas e propostas de solução para o monitoramento e diagnóstico das condições dos Transformadores de Potência imersos em óleo. Em vista da importância do problema para os Sistemas Elétricos de Potência, o trabalho proposto apresenta uma solução, utilizando Lógica *Fuzzy* para programação de inspeções em transformadores baseado na análise de gases combustíveis e nos parâmetros físico-químicos do óleo isolante. O diferencial da proposta reside, principalmente, no fato de considerar no método, além dos gases combustíveis, a avaliação dos parâmetros físico-químicos e do conhecimento tacito dos especialistas, agregando considerável valor à proposta.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O capítulo 3 apresenta de forma detalhada os materiais utilizados para a composição do trabalho e os conceitos dos métodos que foram utilizados para compor o resultado do modelo proposto.

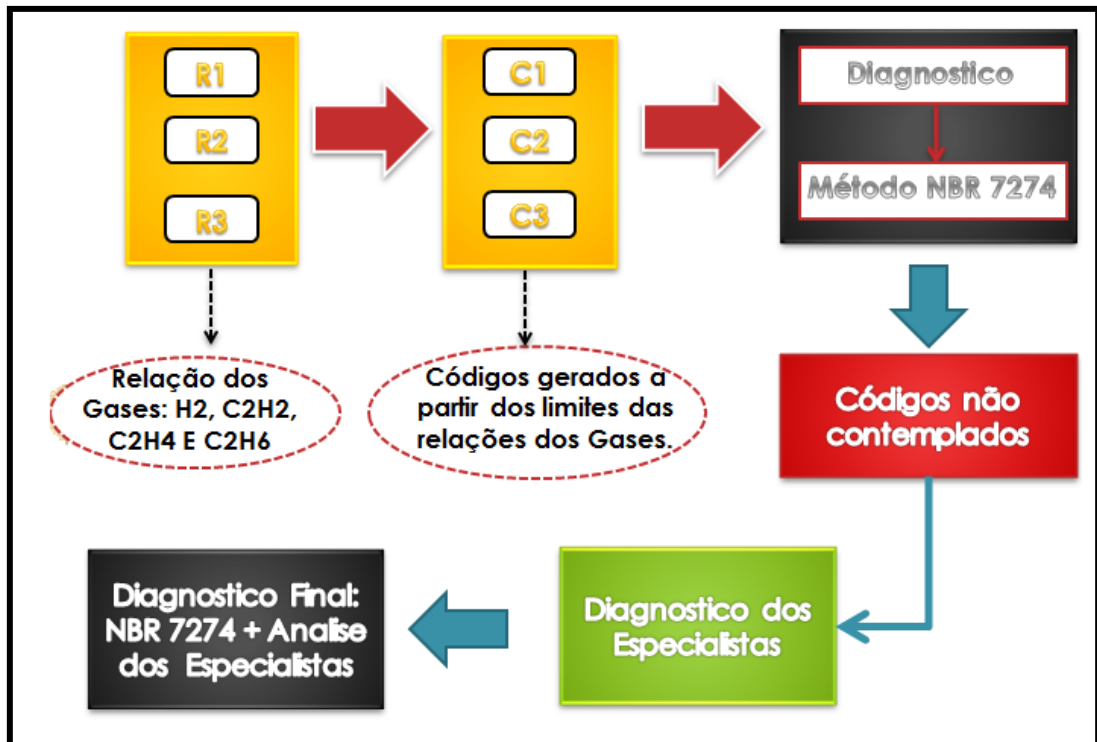
#### **3.1. Área de Estudo**

O banco de transformadores lócus deste estudo fica localizado em Vila do Conde, no município de Barcarena, no Estado do Pará, pertencente à Companhia das Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A – Eletronorte/Eletronorte. Encontra-se na latitude 01°30'21'' sul, longitude 48°37'33'' oeste e a uma altitude de 15 metros em relação ao nível do mar. Atualmente, a cidade de Barcarena é um importante polo industrial do Pará, fornecendo energia para toda a região metropolitana de Belém. Além disso, é um importante ponto de industrialização, exportação e beneficiamento de caulim, alumina, alumínio, bem como de cabos para a transmissão de energia elétrica.

Para este estudo, utilizamos amostras do dreno inferior de 32 diferentes transformadores de 500kv da referida subestação, no período de 2001 a 2006. No processo, utilizaram-se as seguintes concentrações em PPM: hidrogênio ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), etileno ( $C_2H_4$ ) e etano ( $C_2H_6$ ) e os dados da análise físico-química: cor, neutralização, rigidez dielétrica, fator de potência (FP25) e tensão interfacial dos transformadores.

Ao mapearmos o fluxo de como é realizado o diagnostico final dos transformadores chegamos na Figura 3 abaixo:

Figura 3- Mapeamento do Processo de Diagnostico de Transformadores na Eletronorte



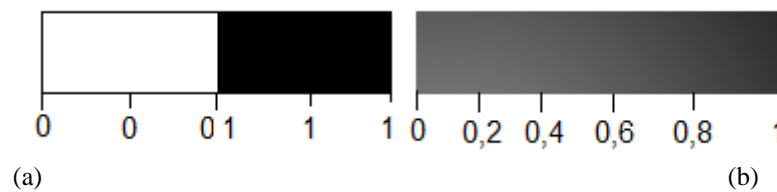
Através da técnica de cromatografia gasosa é possível saber as taxas de cada gás encontrado na amostra do óleo, após acesso a essas taxas é feito a relação entre elas para chegar num número final para cada relação de gás, logo em seguida é aplicado os limites estabelecidos na norma NBR 7274, para poder chegar num código para cada relação, e aplicando o diagnóstico de acordo com o que a norma estabelece para cada conjunto de combinação de códigos, possui o resultado parcial, pois alguns conjuntos de códigos não receberam o diagnóstico por não serem contemplados pela norma, para esses é aplicado o diagnóstico de acordo com o conhecimento tácito dos especialistas e unindo os dois diagnósticos chega-se ao diagnóstico final.

### 3.2. Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy é uma técnica da inteligência computacional que manuseia expressões verbais imprecisas, qualitativas, inerentes à comunicação humana, que possuem vários graus de imprecisão, traduzindo os termos AGDs em valores compreensíveis por computadores (TURBAN & ARONSON, 2001; WANG, L. X., 1997). Estes valores são colocados em uma expressão com um determinado grau de pertinência, sempre em um

intervalo de  $[0,1]$  (Figura 4), onde 1 é a maior pertinência possível. Esta técnica é utilizada para refletir as diferentes nuances que envolvem o pensamento humano, ou seja, uma tentativa de modelar numa escala de pertinência o sentido das palavras, a tomada de decisão e o senso comum. Como resultado, obtêm-se um sistema emulando um processamento próximo do modo de atuação humano (NEGNEVITSKY, 2005).

**Figura 4 - Valores Crisp (a) e Valores Fuzzy (b).**



Fonte: Aguiar (1999).

A ideia por trás da Lógica *Fuzzy* é transformar o conhecimento heurístico em um conjunto de regras linguística do tipo SE <condição> ENTÃO <ação>, onde as expressões “condição” e “ação” não são números ou equações exatas, mas são descritas por palavras ou frases como: “baixo”, “alto”, “muito alto”. O modelo linguístico *Fuzzy* possibilita tratar fenômenos que não podem ser representados via modelagem matemática convencional (PEREIRA, 2005).

### 3.2.1. Histórico

Na década de 1960, Zadeh (1965), introduziu o conceito de conjunto *Fuzzy*. 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, Zadeh publicou, em 1965, um artigo resumindo os conceitos dos conjuntos *Fuzzy*, revolucionando o assunto com a criação de sistemas *Fuzzy*, com limites não precisos. A pertinência em um conjunto *Fuzzy* não é a questão de afirmativo ou negativo, e sim o grau com que se pode afirmar algo (KLIR & YUAN, 1995).

Poucos trabalhos foram feitos nos anos que se seguiram, havendo, até 1971, uma dezena de artigos escritos. Em 1974, Mamdani, na Universidade de Londres, após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com tipos distintos de controladores, incluindo o PID – Polinômios, Integrais e Derivadas –, conseguiu fazê-lo através da aplicação



do raciocínio *Fuzzy* (NUNO & SOUZA, 2003). Esse sucesso serviu de alavanca para muitas outras aplicações.

Estimulados pelo desenvolvimento e pelas enormes possibilidades práticas de aplicações que se apresentaram, os estudos sobre sistemas *Fuzzy* e controle de processos avançaram rapidamente, culminando com a criação, em 1984, da “Sociedade Internacional de Sistemas *Fuzzy*”, constituída, principalmente, por pesquisadores dos países mais avançados tecnologicamente. Os sistemas *Fuzzy* foram inicialmente ignorados nos Estados Unidos porque eram associados com inteligência artificial, um campo que periodicamente se obscurecia, resultando numa falta de credibilidade por parte da indústria.

Ainda segundo Nuno e Souza (2003), os japoneses não tiveram este preconceito; o interesse em sistemas *Fuzzy* foi demonstrado por Yasunobu e Miyamoto da Hitachi, que, em 1985, apresentaram simulações que demonstraram a superioridade de sistemas de controle *Fuzzy* para o caminho de ferro de Sendai. As ideias foram adotadas e sistemas *Fuzzy* foram usados para controle de aceleração e frenagem quando a linha foi inaugurada em 1987.

Outro evento em 1987 que ajudou a promover o interesse em sistemas *Fuzzy* foi o encontro internacional de pesquisadores de *Fuzzy* em Tóquio naquele ano. Yamakawa demonstrou o uso de controle *Fuzzy* em um experimento de um pêndulo invertido, um problema clássico de controle em que um veículo tenta manter um poste montado no seu topo por uma dobradiça vertical com movimentos de ida e volta. Deste ano em diante, o uso de controle e sistemas *Fuzzy* aumentou significativamente, com a utilização desta técnica em sistemas industriais, principalmente onde o processo de decisão admite uma certa tolerância em sua decisão (BORGES, 2003).

### 3.2.2. Conjuntos *Fuzzy*

Segundo Aguiar (1999, p. 67) um conjunto *Fuzzy* é um par  $(A, p[A])$ , sendo  $p[A]:X \Rightarrow [0,1]$  uma função de pertinência que retrata o grau em que os elementos do conjunto  $A$  pertencem ao conjunto AGD  $(A, p[A])$ . Zadeh procurava uma teoria alternativa que pudesse formalizar termos imprecisos. Para isto, baseou-se no fato de que qualquer conjunto clássico pode ser caracterizado por sua função característica  $f_A(x)$ . Conforme ilustrado na equação abaixo:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Na lógica clássica, convencional ou booleana, um elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Na lógica *Fuzzy*, um elemento pertence a um conjunto com certo

grau de pertinência. Zadeh propôs uma generalização da função característica, também conhecida como função de associação ou pertinência, de forma que ela assumira um número infinito de valores no intervalo  $[0,1]$ . Um conjunto *Fuzzy*  $A$  em um universo  $U$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$ , que quantifica o elemento  $x$  para o conjunto *Fuzzy*. Um conjunto *Fuzzy* pode ser expresso por:

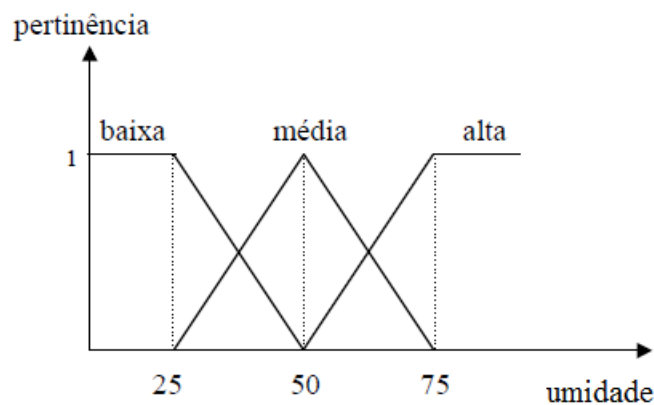
$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in X\}.$$

Nessa equação,  $x$  é um componente do sistema *Fuzzy*,  $\mu_A$  a função de pertinência e  $X$  o universo de discurso ao qual o conjunto pertence (FUJIMOTO, 2005). A função de pertinência associa  $\mu_A$  a um dado componente do universo de discurso  $x$ , o seu respectivo grau de pertinência a um determinado conjunto *Fuzzy*.

### 3.2.3. Variáveis Linguísticas

Uma *variável linguística* é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *Fuzzy*. Por exemplo, a *umidade* de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores *baixa*, *média* e *alta*. Estes *valores* são descritos por intermédio de conjuntos *Fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Funções de pertinência para a variável umidade.



Generalizando, os *valores* de uma *variável linguística* podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de *termos primários* (por exemplo, *alto*, *baixo*, *pequeno*, *médio*, *grande* e *zero*), de *conectivos lógicos* (negação *não*, conectivos *e* e *ou*), de *modificadores* (*muito*, *pouco*, *levemente*, *extremamente*) e *delimitadores* (como parênteses).

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, que não a de

variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

Formalmente, uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla  $(N, T(N), X, G, M)$ , onde:  $N$ : nome da variável;  $T(N)$ : conjunto de termos de  $N$ , ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de  $N$ ;  $X$ : universo de discurso;  $G$ : Regra sintática para gerar os valores de  $N$  como uma composição de termos de  $T(N)$ , conectivos lógicos, modificadores e delimitadores;  $M$ : regra semântica, para associar a cada valor gerado por  $G$  um conjunto fuzzy em  $X$ . No exemplo da variável *umidade* da Figura 5, teríamos:  $N$ : umidade;  $T(N)$ : {baixa, média, alta};  $X$ : 0 a 75.

### 3.2.4. Operações com Conjuntos Fuzzy

As operações com conjuntos *Fuzzy* ( $A$  e  $B$ ) são definidas por meio da operação de suas funções de pertinência ( $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ ) (BOJADZIEV, G.; BOJADZIEV, M, 1996). Elas não particionam o conjunto, mas determinam a compatibilidade entre cada conjunto *Fuzzy* e seu valor no domínio (COX, 1994). As principais operações com conjuntos *Fuzzy* são a união e a intersecção, conforme definido abaixo:

**a) União:** a operação de união entre dois conjuntos *Fuzzy* é semelhante à operação de união entre dois conjuntos clássicos  $A \cup B$ . A função de inclusão  $\mu_U(x)$  da união de conjuntos  $A$  e  $B$  ( $U = A \cup B$ ) é definida como:  $\mu_U(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ ,  $x \in X$ .

**b) Intersecção:** a função de inclusão  $\mu_I(x)$  da intersecção dos conjuntos  $A$  e  $B$  ( $I = A \cap B$ ) é definida como:  $\mu_I(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ ,  $x \in X$ .

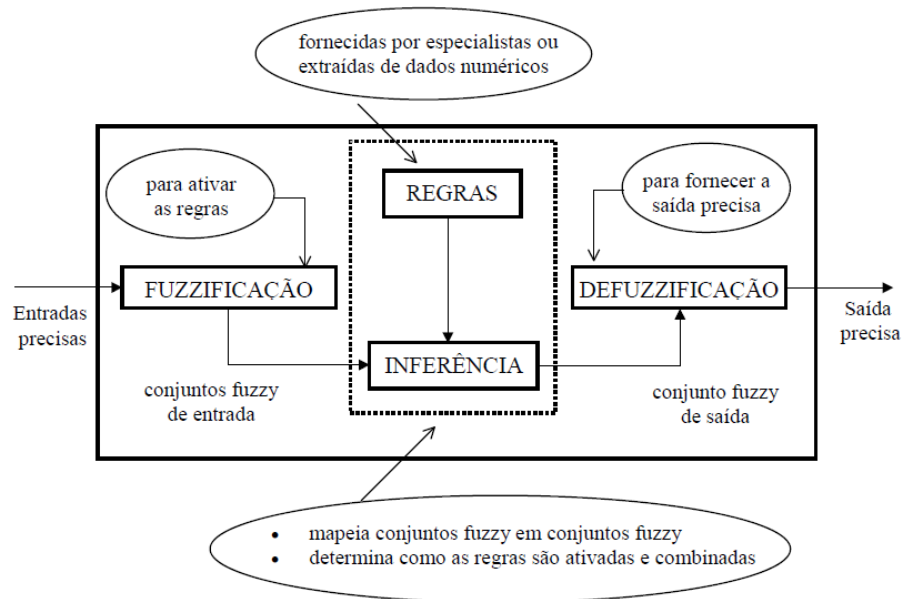
### 3.2.5. Regras Fuzzy

Conforme L. X. Wang (1997), em sistemas *Fuzzy*, o conhecimento humano é representado por regras de produção *Fuzzy* do tipo “SE-ENTÃO”. SE <proposição *Fuzzy*>, ENTÃO <proposição *Fuzzy*>.

### 3.2.6. Estrutura de um Sistema Fuzzy

Um sistema de inferência *Fuzzy* é composto por quatro componentes: fuzzificador, defuzzificador, máquina de inferência *Fuzzy* e base de regras *Fuzzy*, onde estão identificadas as funções de cada bloco, conforme ilustrado na Figura 6 e explicado nas próximas sessões.

**Figura 6 - Estrutura de um Sistema Fuzzy.**



Fonte: Aguiar (1999).

### 3.2.6.1. Fuzzificador

Um fuzzificador é definido como um mapeamento de um ponto real  $x^*$  pertencente a  $U$ , que está contido em  $R$ , para um conjunto *Fuzzy*  $A'$  em  $U$  (WANG, L. X., 1997). Existem vários critérios para o projeto de um fuzzificador: i) O fuzzificador deve considerar o fato que a entrada é um ponto não *Fuzzy*  $x^*$ , isto é, o conjunto  $AGD A'$  deve ter alto valor de pertinência em  $x^*$ ; ii) Se a entrada é corrompida por ruído, então é desejável que o fuzzificador ajude a supri-lo; iii) O fuzzificador deve ajudar a simplificar os cálculos envolvidos na máquina de inferência difusa.

Existem várias propostas de fuzzificadores: fuzzificador Gaussiano, fuzzificador triangular, fuzzificador trapezoidal, etc. No desenvolvimento desse trabalho, foram utilizados fuzzificadores triangulares e trapezoidais que, além de simplificarem os cálculos na máquina de inferência, foram adequados para o mapeamento perceptivo das variáveis consideradas na solução.

### 3.2.6.2. Base de Regras Fuzzy

A base de regras *Fuzzy* consiste de um conjunto de regras de produção do tipo “IF-THEN”. A base de regra é bastante intuitiva, se a classificarmos sob o ponto de vista humano. Um conjunto de regras *Fuzzy* “IF-THEN” é consistente se não existem regras com a mesma parte “IF” e diferentes parte “THEN”. Um conjunto de regras *Fuzzy* “IF-THEN” é contínuo se

não existem regras vizinhas cujos conjuntos *Fuzzy* da parte “THEN” têm interseção vazia. Intuitivamente, “continuidade” significa que o comportamento dinâmico da relação entrada-saída no sistema *Fuzzy* deve ser suave (WANG, L. X., 1997).

### 3.2.6.3. Inferência *Fuzzy*

A inferência *Fuzzy* pode ser definida como o processo de mapeamento de um determinado *input* para um *output*, utilizando a teoria dos conjuntos *Fuzzy*. No caso deste trabalho, a técnica de inferência utilizada foi a de Mandani, que é mais apropriada para problemas onde há a necessidade de representar o conhecimento especialista. A inferência de Mandani permite descrever a perícia de um modo mais intuitivo e humano. O estilo Mandani de inferência *Fuzzy* é realizado em quatro passos: fuzzificação das variáveis de entrada, ativação das regras, agregação das saídas das regras e por último a defuzzificação (NEGNEVITSKY, 2005).

O primeiro passo é receber as entradas no formato *crisp*, ou seja, um valor numérico no universo de discurso, e determinar o grau em que essas entradas pertencem a cada um de seus respectivos conjuntos *Fuzzy*. Em seguida, os valores fuzzificados são obtidos e aplicados aos antecedentes da base de regras. Se uma determinada regra possui múltiplos antecedentes, o operador *Fuzzy* (E ou OU) é utilizado para a obtenção de um único número que represente o resultado do antecedente. Finalmente, o número resultante é aplicado à função de pertinência consequente para ser defuzzificado.

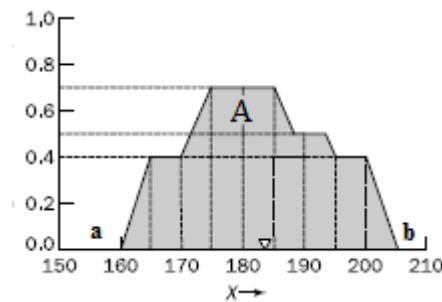
### 3.2.6.4. Defuzzificador

A defuzzificação é a transformação da saída do conjunto *Fuzzy* consequente em um número único *crisp*. A defuzzificação utilizada neste estudo foi o método do centroide, que busca encontrar o ponto onde uma linha vertical iria “cortar” o conjunto resultante em duas massas iguais. Conforme Negnevitsky (2005), matematicamente, pode ser expresso por:

$$C = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx}$$

A defuzzificação por centroide também pode ser definida como o ponto que representa o centro de gravidade de um conjunto *Fuzzy* A, no intervalo ab (Figura 7).

**Figura 7 - Defuzzificação por Centroide**



Fonte: Adaptado de Negnevitsky (2005).

Existem na literatura, várias propostas de tipos de defuzzificadores além do centroide, como centro ponderado, máximo valor, etc. (WANG, L. X., 1997). O defuzzificador centro de gravidade ou centroide foi o defuzzificador utilizado para mapear o conjunto de saída para valores reais. Esse defuzzificador além de computacionalmente simples, apresenta valor de saída bem intuitivo, contemplando, portanto, o propósito da solução abordada neste trabalho.

### 3.3. Análise Fatorial

A Análise Fatorial – AF – é uma técnica estatística multivariada que objetiva definir a estrutura subjacente em uma matriz de dados. Pode ser aplicada para analisar as correlações entre um grande número de variáveis e explicá-las em termos de suas dimensões inerentes comuns (fatores). Esta técnica visa resumir e reduzir um determinado conjunto de dados. É indicada quando há necessidade de identificar as variáveis mais representativas em um determinado conjunto de dados ou de representar melhor um número menor de variáveis (HAIR et al, 1998).

A análise fatorial pode auxiliar na seleção de um subconjunto representativo de variáveis ou na criação de novas variáveis como substitutas das variáveis originais. A matriz de correlação dos dados de entrada pode ser calculada a partir da computação das correlações entre as variáveis ou entre os respondentes individuais. As variáveis para AF devem ser métricas e deve-se minimizar o número de variáveis, mas manter um número razoável de variáveis por fator (HAIR et al, 1998).

Neste trabalho, os pré-requisitos para adequação da Análise Fatorial utilizados como critérios para escolher os fatores que melhor representam a estrutura dos dados, foram: o *Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Adequacy* (KMO) maior que 0,50 e o teste de Bartlett. O

KMO é uma medida que serve para quantificar o grau de correlação entre variáveis. Este índice varia de 0 a 1, alcançando 1 quando cada variável é perfeitamente prevista sem erro pelas outras variáveis, sendo inaceitáveis valores abaixo de 0,50. O teste Bartlett de esfericidade é um método que examina a matriz de correlação inteira, fornecendo a probabilidade estatística destas correlações significantes entre pelo menos algumas das variáveis (JOHNSON & WICHERN, 2001; HAIR et al, 1998).

A Análise de Componentes Principais – ACP – é um método de extração de fatores apropriado quando a preocupação principal é a previsão ou o número mínimo de fatores necessários para explicar a parte máxima da variância, representada no conjunto original de variáveis. O método primeiro extrai as combinações de variáveis que explicam o maior montante de variância e então segue para combinações que explicam montantes cada vez menores de variância. A quantidade de fatores a extrair pode ser escolhida com base em critérios pré-determinados, normalmente o percentual de variância ou o critério da raiz latente.

No critério de percentagem de variância, os fatores são escolhidos de forma que juntos expliquem, pelo menos, 95% da variância total. No critério da raiz latente, critério utilizado neste trabalho, qualquer fator individual deve explicar a variância de pelo menos uma variável. Cada variável contribui com um valor 1 do autovalor total. Logo, apenas os fatores que tenham raízes latentes ou autovalores maiores que 1 são considerados significantes, os demais fatores são descartados (JOHNSON & WICHERN, 2001; HAIR et al, 1998).

A matriz fatorial não rotacionada é computada para auxiliar na obtenção de uma indicação preliminar do número de fatores a extrair. Soluções com fatores não rotacionados atingem o objetivo de redução de dados, porém, podem não fornecer a interpretação mais adequada das variáveis. Em geral, a rotação é desejável porque simplifica a estrutura fatorial. A rotação fatorial pode ser ortogonal, na qual os eixos são mantidos a 90 graus, ou oblíqua, quando não há restrição de os eixos serem ortogonais. A rotação fatorial ortogonal é a mais comum. Entre as principais abordagens ortogonais destacam-se: a *quadrimax* (simplifica as linhas da matriz fatorial); *varimax* (simplifica as colunas da matriz fatorial) utilizada neste trabalho; e, *equimax* (simplifica as linhas e colunas da matriz fatorial, porém, não apresenta bons resultados) (JOHNSON & WICHERN, 2001; HAIR et al, 1998).

As cargas fatoriais e as comunalidades – valor que representa a quantidade de variância explicada pela solução fatorial para cada variável – devem ser analisadas. Caso não

apresentem valores satisfatórios é preciso remover alguma variável e executar a análise de componentes ou de fatores comum novamente.



## 4. SOLUÇÃO PROPOSTA

O capítulo 4 apresenta as etapas envolvidas no método proposto, compreendendo todo o processo da análise estatística dos dados sobre os gases dissolvidos e os parâmetros físico-químicos do óleo isolante dos transformadores e o sistema fuzzy construído a partir do conhecimento adquirido dos especialistas e do resultado da análise estatística.

### 4.1. Análise Fatorial dos dados

Neste trabalho, utilizou-se a Análise Fatorial para identificar a correlação simultânea dos parâmetros físico-químicos do óleo, dos gases e das condições ambientais no momento da coleta. O método utilizado foi o de Análise de Componentes Principais, com rotação ortogonal dos eixos via *varimax*. Na Análise Fatorial com rotação *varimax* foram consideradas as seguintes variáveis: *Temperatura (°C)*, *Umidade (%)*, *H<sub>2</sub>*, *CH<sub>4</sub>*, *C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>*, e *C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>*; *Cor*, *Neutralização*, *Rigidez Dielétrica*, *Fator de Potência (PF25)* e *Tensão Interfacial*. Esta análise resultou em quatro fatores, apresentando 92.0% da variância total de todo processo (Tabela 1). O valor de *KMO* (*Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Adequacy*) foi acima de 0,500 para a matriz completa e o teste de *Bartlett* apresentou-se significativo, indicando ser apropriada a aplicação da técnica.

Tabela 1 - Fatores do Sistema de Medição de Potência.

VARIÁVEL	COMUNALIDADE	FATOR			
		1	2	3	4
Temperaturas	0.894	0.039	-0.176	0.915	0.155
Umidade	0.991	0.094	0.114	-0.974	0.139
H <sub>2</sub>	0.836	0.891	-0.118	0.117	-0.124
CH <sub>4</sub>	0.967	0.968	0.093	-0.043	0.138
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.939	0.958	0.026	-0.141	-0.008
Tensão Interfacial	0.966	-0.083	-0.963	0.114	-0.138
Cor	0.974	0.184	0.929	-0.237	0.142
Neutralização	0.963	-0.348	0.890	-0.034	0.221
Rigidez Dielétrica	0.820	0.402	-0.019	0.359	-0.728
FP25	0.799	0.020	0.215	0.104	0.861
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.969	0.472	0.389	0.150	0.757
% Variância		33.76	28.90	17.54	11.80
% Variância explicada		33.76	62.65	80.19	92.00

Na Tabela 1, o primeiro fator representa os gases H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> correspondendo a 33.76% da variância total, demonstrando que as formações dos gases combustíveis são liberadas a partir das reações químicas de forma equivalente. O segundo fator, correspondendo a 28.90% da variância total, é representado pelos parâmetros físico-químicos: Tensão Interfacial, Cor, Neutralização. O aumento da cor corresponde à oxidação, com conseqüente aumento da acidez, pela formação de compostos polares, diminuindo a tensão interfacial.

O terceiro fator representa a temperatura e a umidade, correspondendo a 17.54% da variância total. A correlação inversa indica que a umidade interfere em menor escala com baixas temperaturas, ou seja, com a temperatura ambiente maior a umidade diminui favorecendo a coleta do óleo. A separação desta variável em um fator isolado é previsível devido à amostra coletada não ter contato com o meio ambiente mesmo que a condição do equipamento esteja em área com atmosfera úmida, de acordo com a norma ABNT NBR 7070, estabelecida por processo.

O quarto fator representa 11.8% da variância total, representada pelo gás  $C_2H_6$  e pelos parâmetros físico-químicos: Rigidez dielétrica e Fator de Potência. Pode ser observado que se o gás Etano aumenta, a rigidez dielétrica diminui e o fator de potência 25kv (PF25) aumenta, devido à decomposição polimérica que ocorre no gás.

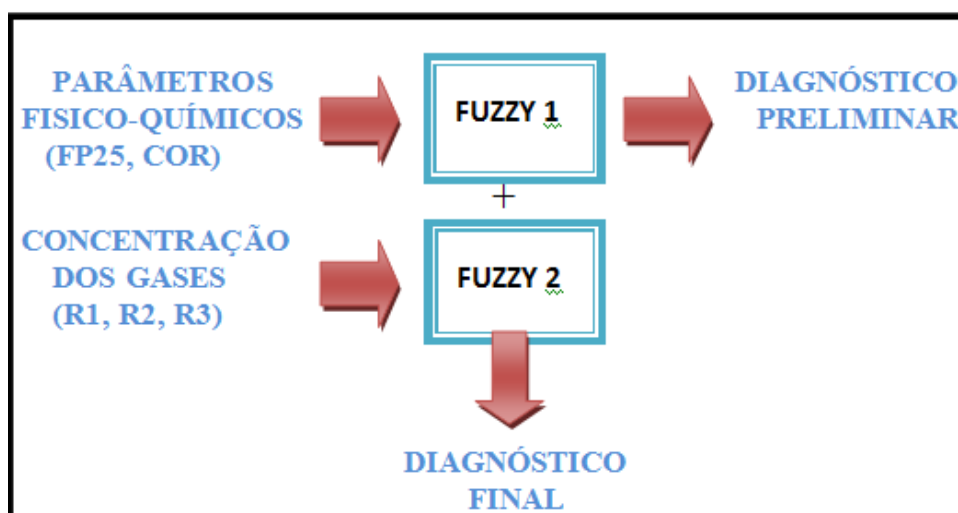
#### 4.2. Análise de Gases Dissolvidos no óleo isolante

Para a análise de gases dissolvidos no óleo isolante, este trabalho, utilizou o método estabelecido pela NBR 7274, cuja classificação de diagnósticos está descrita no Quadro 8, com os critérios baseados na IEC 60599.

#### 4.3. Solução *Fuzzy* proposta

A solução *Fuzzy* proposta levou em consideração o conhecimento adquirido a partir da Análise Fatorial e o conhecimento tácito dos especialistas da Eletronorte. Adotou-se a estrutura de sistema da **Error! Reference source not found.8**, constituída de dois módulos. O primeiro (*Fuzzy 1*) apresenta um diagnóstico preliminar do equipamento a partir dos parâmetros físico-químicos (FP25 e COR) do óleo isolante e, o segundo (*Fuzzy 2*) apresenta o diagnóstico final a partir da avaliação das razões de concentração dos gases  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_6/C_2H_6$ , representados respectivamente por: R1, R2 e R3. Ou seja, as duas soluções se complementam, fortalecendo o potencial de acerto do diagnóstico final.

Figura 8- Estrutura do sistema proposto



A partir dos domínios das variáveis, do conhecimento tácito dos especialistas e da realização de alguns ensaios, as variáveis consideradas no Módulo *Fuzzy 1* foram mapeadas

por meio de funções de pertinências triangular e trapezoidal, conforme ilustrado na Figura 10. Na Figura 9 é demonstrado o modelo de funcionamento do Módulo *Fuzzy* 1.

Figura 9 - Modelo de Funcionamento do Módulo *Fuzzy* 1

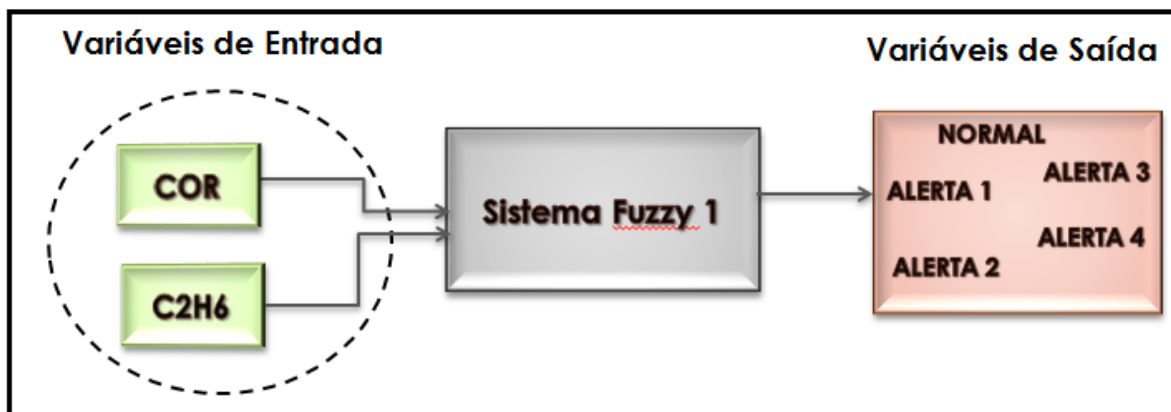
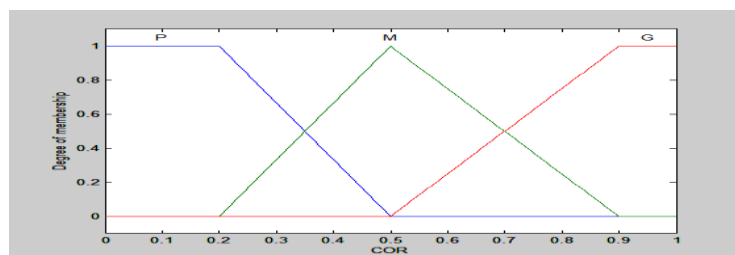
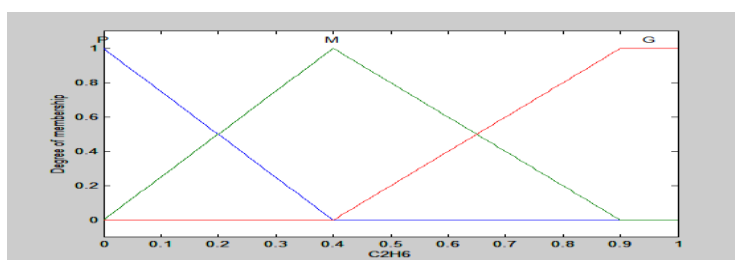


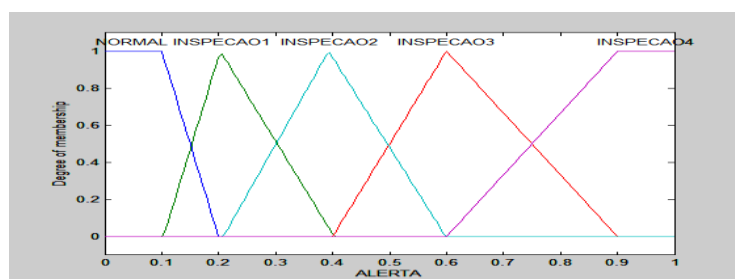
Figura 10 - Variáveis de entrada e saída do módulo *Fuzzy* 1.



(a)



(b)



(c)

A Análise Fatorial especificada na Tabela 1 constatou que se o gás Etano ( $C_2H_6$ ) aumenta a **rigidez dielétrica diminui** e o **fator de potência 25kv (PF25) aumenta** podendo representar um risco adicional para a operacionalidade do equipamento. Por outro lado, o aumento da cor corresponde à oxidação, com conseqüente aumento da acidez, pela formação de compostos polares, diminui a tensão interfacial. Logo, combinando o resultado das duas constatações, chega-se às seguintes regras de produção para o Módulo *Fuzzy 1* demonstrados na Figura 11 abaixo:

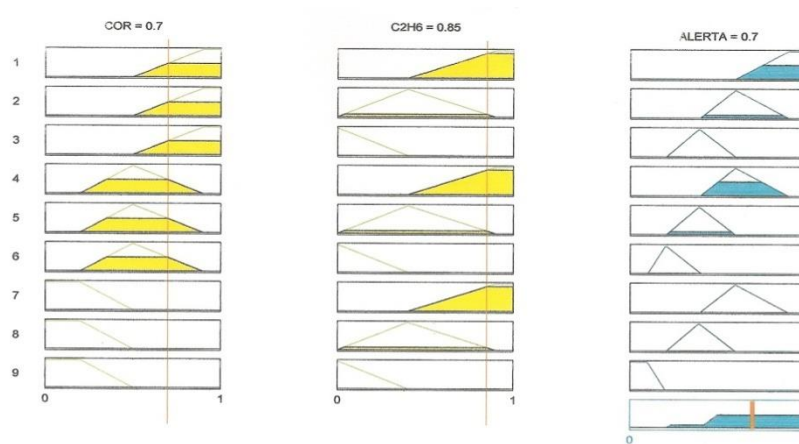
**Figura 11 - Regras de Produção do Módulo Fuzzy 1**

NUMERO	REGRA
01	IF COR IS G AND C2H6 IS G THEN ALERTA INSPECAO4
02	IF COR IS G AND C2H6 IS M THEN ALERTA INSPECAO3
03	IF COR IS G AND C2H6 IS P THEN ALERTA INSPECAO2
04	IF COR IS M AND C2H6 IS G THEN ALERTA INSPECAO3
05	IF COR IS M AND C2H6 IS M THEN ALERTA INSPECAO2
06	IF COR IS M AND C2H6 IS P THEN ALERTA INSPECAO1
07	IF COR IS P AND C2H6 IS G THEN ALERTA INSPECAO3
08	IF COR IS P AND C2H6 IS M THEN ALERTA INSPECAO2
09	IF COR IS P AND C2H6 IS P THEN ALERTA NORMAL

Onde, o conseqüente das regras, ALERTA DE INSPEÇÃO, estabelece em ordem crescente a gravidade do estado do equipamento (NORMAL a INSPECAO4). As variáveis de entrada tiveram seus universos de discurso mapeados com três conjuntos *Fuzzy*, PEQUENO (P), MÉDIO (M) e GRANDE (G), conforme especificado nas figuras 11 (a) e (b). A variável de saída ALERTA, Figura 11 (c), foi mapeada com 5 (cinco) conjuntos *Fuzzy* (NORMAL, INSPECAO1, INSPECAO2, INSPECAO3 e INSPECAO4).

A Figura 12 apresenta uma saída do sistema para os valores COR = 0,7 (“grande”) e  $C_2H_6$  (etano) = 0,85 (“grande”), mostrando como ALERTA o valor 0,7 ou 70%, o que representa uma situação real de ALERTA DE INSPEÇÃO da mais alta prioridade para o equipamento, ou seja, com esse diagnóstico, o técnico que o supervisiona, concluirá que é necessário realizar uma inspeção para uma manutenção preditiva, antes que possa chegar numa situação de falha total, sendo necessária a retirada do equipamento.

**Figura 12 - Representação de uma Saída do Módulo *Fuzzy 1*.**



Similarmente ao ocorrido no Módulo *Fuzzy 1*, as variáveis de entrada e de saída do Módulo *Fuzzy 2*, foram especificadas a partir dos respectivos domínios das variáveis consideradas na solução, do conhecimento tácito dos especialistas e da realização de alguns ensaios. Todas as variáveis consideradas no Módulo *Fuzzy 2* foram mapeadas por meio de funções de pertinência triangular e trapezoidal, conforme ilustrado na Figura 14. A Figura 13 apresenta o modelo de funcionamento do Módulo *Fuzzy 2*.

**Figura 13 - Modelo de Funcionamento do Módulo *Fuzzy 2***

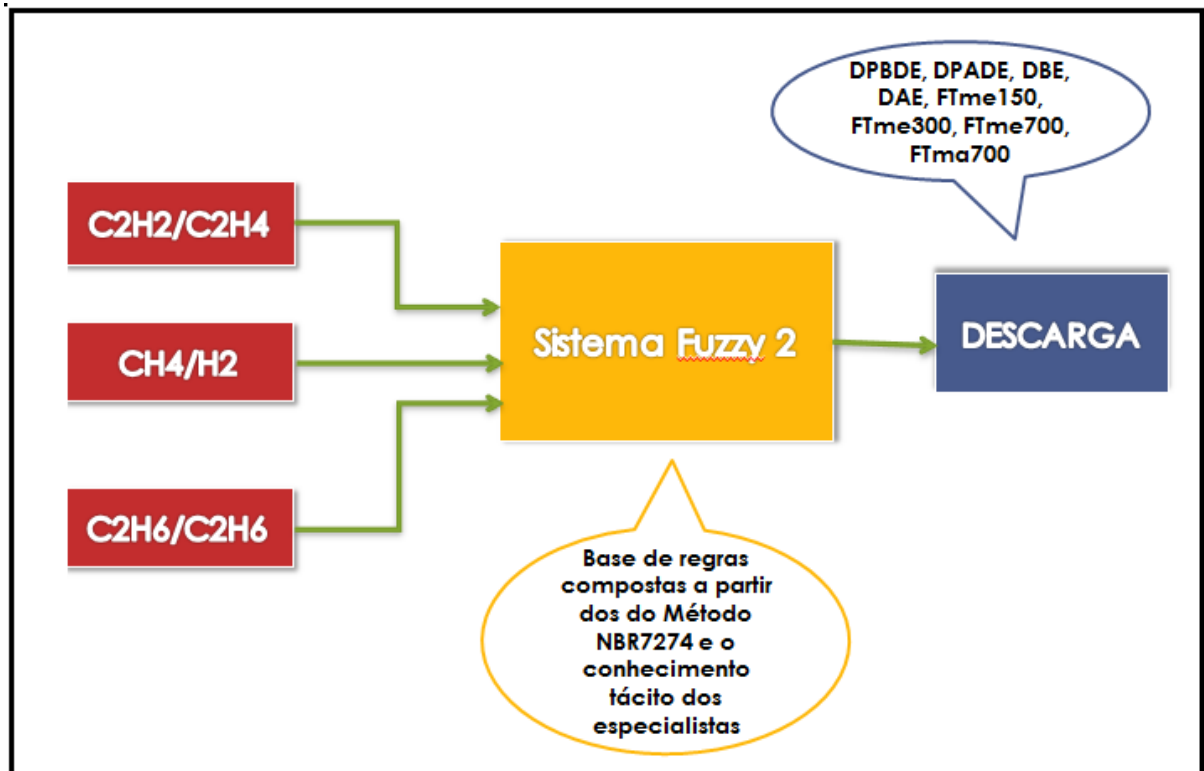
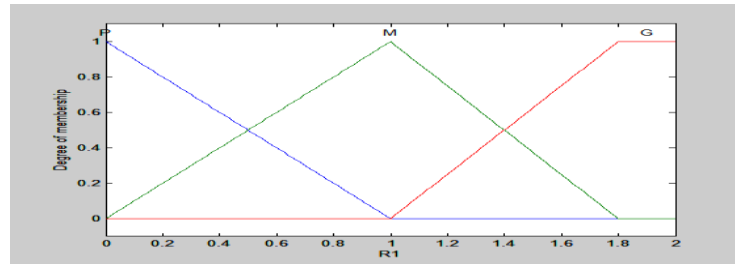
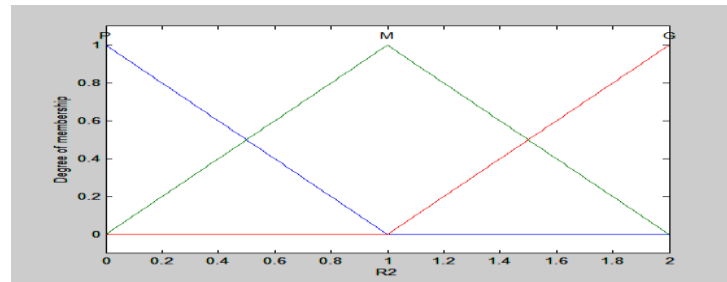


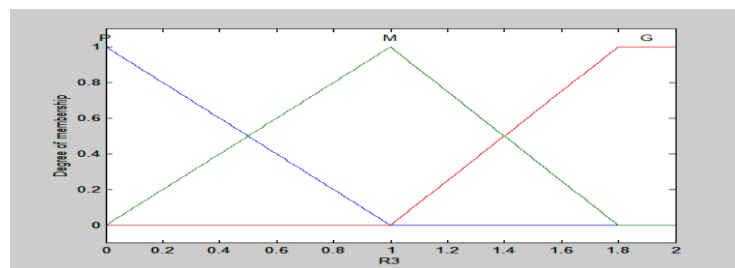
Figura 14 - Variáveis de Entrada e Saída do Módulo *Fuzzy 2*.



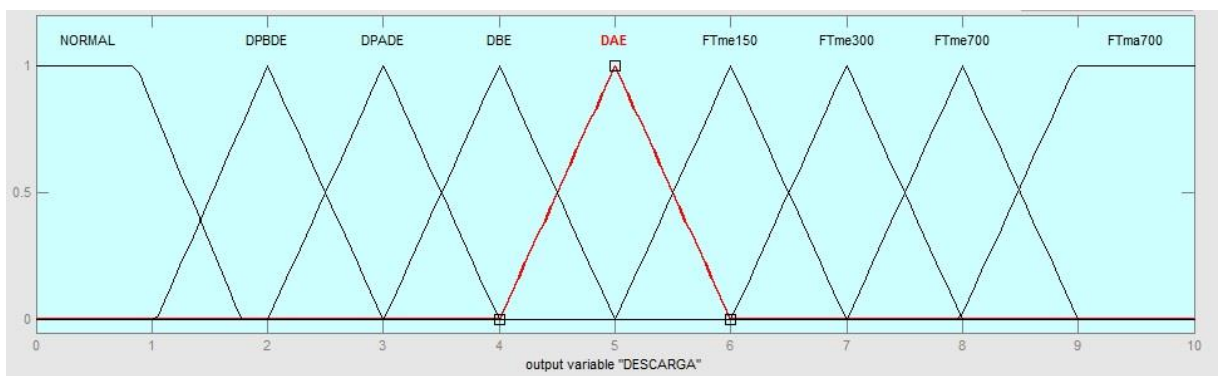
(a)



(b)



(c)



A base de regras do Módulo *Fuzzy 2* foi construída a partir do que dispõe a norma NBR 7274 e com o conhecimento tácito dos especialistas na técnica de gás cromatografia da Eletronorte, cobrindo algumas combinações não previstas na referida norma, conforme especificado na Quadro 9.

**Quadro 9 - Relação dos Códigos não contemplados na NBR7274.**

RELAÇÃO DOS CÓDIGOS			DIAGNÓSTICO	
R1	R2	R3		
0	1	1	Descarga de baixa energia	E
0	1	2	Descarga de baixa energia	E
0	0	2	Falha térmica <150°C	E
1	1	1	Descarga de alta energia	E
1	1	2	Descarga de alta energia	E
1	0	0	Descarga de baixa energia	E
1	2	0	Descarga de baixa energia	L
1	2	1	Descarga de baixa energia	E
1	2	2	Descarga de baixa energia	E
2	0	0	Descarga de baixa energia	L
2	2	0	Descarga de baixa energia	L
2	2	1	Descarga de baixa energia	L
2	2	2	Descarga de baixa energia	L

Legenda:

- E: Diagnóstico adquirido através do especialista.
- L: Diagnóstico adquirido através da literatura.

Combinando o estabelecido na norma NBR 7274 com o conhecimento tácito dos especialistas, chegou-se às 17 regras de produção para o Módulo *Fuzzy 2* apresentados na Figura 15 abaixo:



Figura 15- Regras de Produção do Módulo *Fuzzy* 2

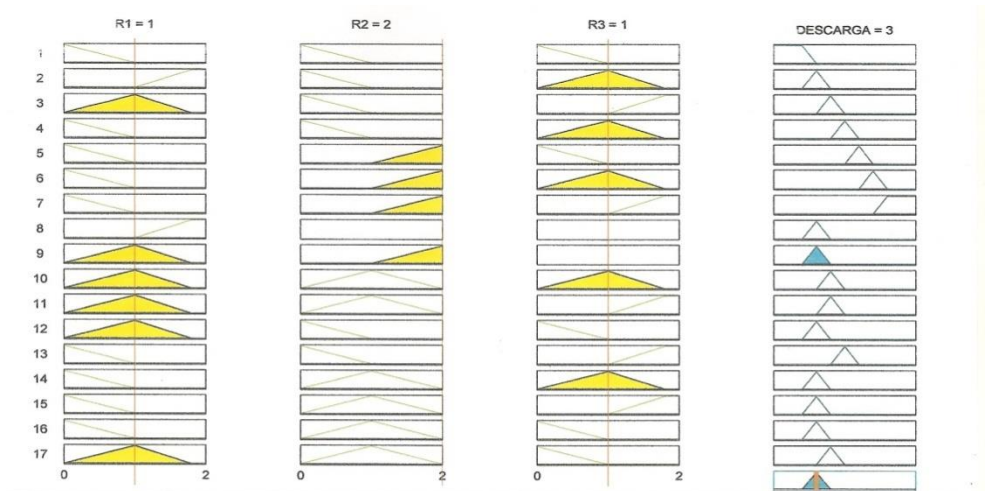
NUMERO	REGRA
01	IF R1 IS P AND R2 IS P AND R3 IS P THEN DESCARGA NORMAL
02	IF R1 IS P AND R2 IS M AND R3 IS P THEN DESCARGA DPBDE
03	IF R1 IS P AND R2 IS P AND R3 IS M THEN DESCARGA FTme150
04	IF R1 IS P AND R2 IS G AND R3 IS P THEN DESCARGA FTme300
05	IF R1 IS P AND R2 IS G AND R3 IS M THEN DESCARGA FTme700
06	IF R1 IS P AND R2 IS G AND R3 IS G THEN DESCARGA FTma700
07	IF R1 IS P AND R2 IS P AND R3 IS G THEN DESCARGA FTme150
08	IF R1 IS P AND R2 IS M AND R3 IS G THEN DESCARGA DPBDE
09	IF R1 IS P AND R2 IS M AND R3 IS M THEN DESCARGA DBE
10	IF R1 IS M AND R2 IS M AND R3 IS P THEN DESCARGA DPADE
11	IF R1 IS M AND R2 IS P AND R3 IS G THEN DESCARGA DAE
12	IF R1 IS M AND R2 IS M AND R3 IS M THEN DESCARGA DPADE
13	IF R1 IS M AND R2 IS M AND R3 IS G THEN DESCARGA DPADE
14	IF R1 IS M AND R2 IS P AND R3 IS P THEN DESCARGA DBE
15	IF R1 IS M AND R2 IS M AND R3 IS G THEN DESCARGA DPADE
16	IF R1 IS M AND R2 IS G AND R3 IS P THEN DESCARGA DBE
17	IF R1 IS M AND R2 IS P AND R3 IS P THEN DESCARGA DBE
18	IF R1 IS M AND R2 IS P AND R3 IS M THEN DESCARGA DBE
19	IF R1 IS M AND R2 IS G AND R3 IS M THEN DESCARGA DBE
20	IF R1 IS M AND R2 IS G AND R3 IS G THEN DESCARGA DBE
21	IF R1 IS G AND R2 IS P AND R3 IS P THEN DESCARGA DBE
22	IF R1 IS G AND R2 IS G AND R3 IS P THEN DESCARGA DBE
23	IF R1 IS G AND R2 IS G AND R3 IS M THEN DESCARGA DBE
24	IF R1 IS G AND R2 IS G AND R3 IS G THEN DESCARGA DBE
25	IF R1 IS G AND R2 IS P AND R3 IS M THEN DESCARGA DBE
26	IF R1 IS G AND R2 IS P AND R3 IS G THEN DESCARGA DBE

As variáveis de entrada do Módulo *Fuzzy* 2 são as razões de concentração dos gases  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$ , representadas, respectivamente, por R1, R2 e R3; e, a de saída, representada pela variável DESCARGA. Cada variável de entrada foi mapeada por três conjuntos *Fuzzy*: Pequena (P), Média (M) e Grande (G). Para cada combinação das variáveis de entrada foi possível associar um padrão de falha como saída, representados pelos conjuntos *Fuzzy*: Envelhecimento Normal (NORMAL), Descarga Parcial de Baixa Densidade de Energia (DPBDE), Descarga Parcial de Alta Densidade de Energia (DPADE), Descarga de Baixa Energia (DBE), Descarga de Alta Energia (DAE), Falha térmica <150°C (FTme150),

Falha térmica 150° - 300°C (FTme300), Falha térmica 300° - 700°C (FTme700) e Falha térmica >700°C (FTma700).

A Figura 16 apresenta uma saída do Módulo *Fuzzy 2* para os valores  $R1=1$  (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> “médium”),  $R2=2$  (CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> “high”) e  $R3=1$  (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> “médium”), mostrando como DESCARGA o valor 3, o que representa uma situação de *Descarga de Baixa Energia*, uma falha elétrica.

**Figura 16 - Representação de uma Saída do Módulo *Fuzzy 2*.**



A implementação da solução proposta utilizou a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox™* do *software* Matlab. A máquina de inferência utilizada foi o método da implicação mínima do Mandani [13].

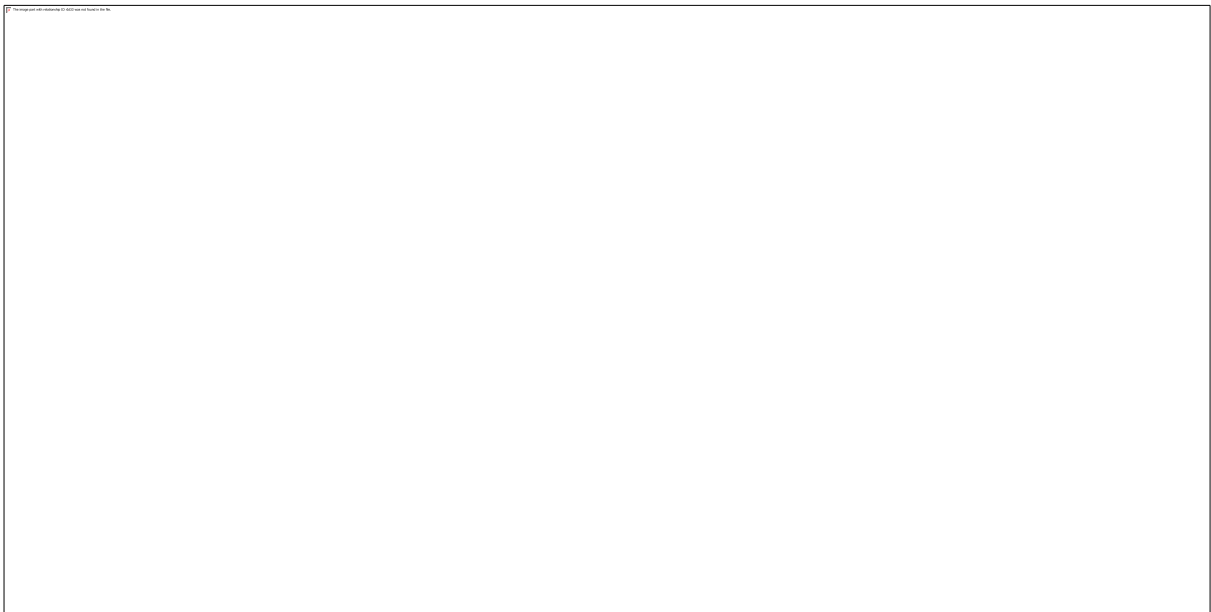
## 5. VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO

O conhecimento adquirido por meio da Análise Fatorial foi fundamental para a validação da solução, diferenciando-se de outros métodos preditivos ao considerar na solução a análise de gases combustíveis e dos parâmetros físico-químicos do óleo isolante, o que tende a uma melhoria na eficácia do processo.

Associando numa única figura os resultados obtidos pelos Módulos Fuzzy 1 e Fuzzy 2, estão transcritos a seguir algumas simulações realizadas para validação da proposta, com dados do banco de dados da Eletronorte e ajuda dos especialistas:

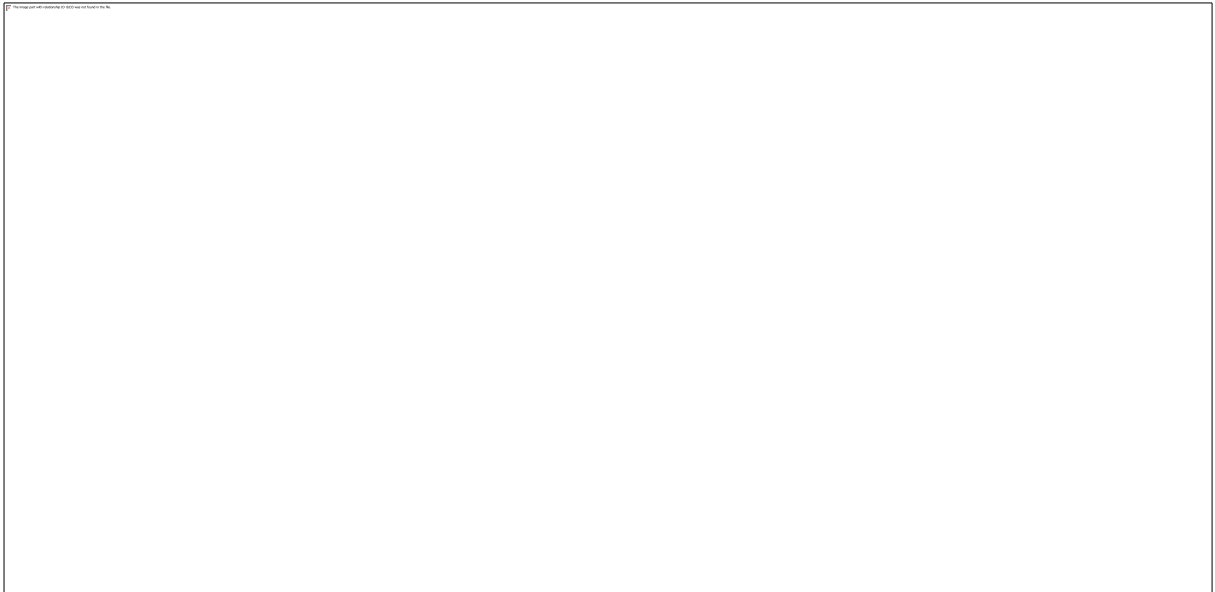
**Simulação 01:**  $R1 = 0,05$   $R2 = 0,002$  e  $R3 = 0$  e  $COR = 0,04$   $C2H6 = 0,02$  mostrando como resultado  $DESCARGA = 0,92$  e  $RISCO = 0,113$ . De acordo com a base de regra o resultado demonstra que o equipamento está com o estado NORMAL. O resultado pode ser visualizado na Figura 17 e foram validados pelos especialistas e julgados adequados para a situação analisada.

**Figura 17 - Simulação 01 - Fuzzy + Fuzzy 2.**



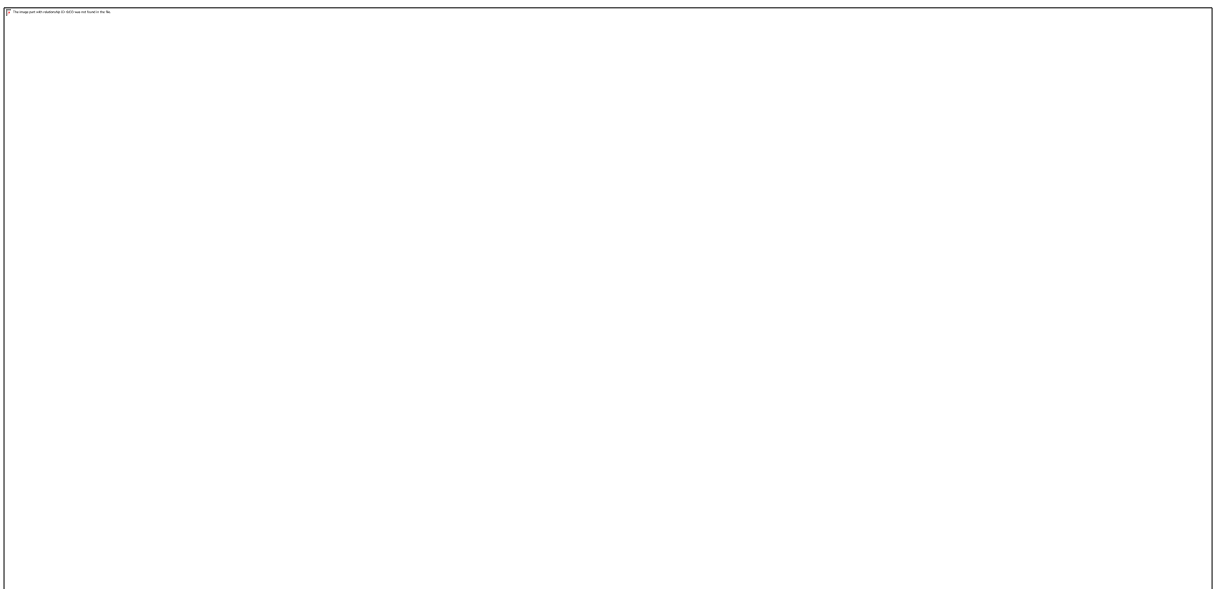
**Simulação 02:**  $R1 = 0,01$   $R2 = 1$  e  $R3 = 0,02$  e  $COR = 0,5$   $C2H6 = 0,02$  mostrando como resultado  $DESCARGA = 2,05$  e  $RISCO = 0,25$ . De acordo com a base de regra o resultado demonstra que o equipamento está com o estado DBE (Descarga de Baixa Energia) e Inspeção 01 (Risco Baixo). O resultado pode ser visualizado na Figura 18 e foram validados pelos especialistas e julgados adequados para a situação analisada

**Figura 18 - Simulação 02 - Fuzzy + Fuzzy 2.**



**Simulação 03:**  $R1 = 1$   $R2 = 2$   $R3 = 1$  e  $COR = 0,5$   $C2H6 = 0,5$  mostrando como resultado  $DESCARGA = 4$  e  $RISCO = 0,477$ . De acordo com a base de regra o resultado demonstra que o equipamento está com o estado DPBE (Descarga Parcial de Baixa Energia) e Inspeção 02 (Risco Médio). O resultado pode ser visualizado na Figura 19 e foram validados pelos especialistas e julgados adequados para a situação analisada.

**Figura 19 -- Simulação 03 - Fuzzy + Fuzzy 2.**



**Simulação 04:**  $R1 = 0,01$   $R2 = 2$   $R3 = 0$  e  $COR = 1$   $C2H6 = 0,5$  mostrando como resultado  $DESCARGA = 6,94$  e  $RISCO = 0,665$ . De acordo com a base de regra o resultado demonstra que o equipamento está com o estado FTme300 (Falha térmica 300°-700°C) e

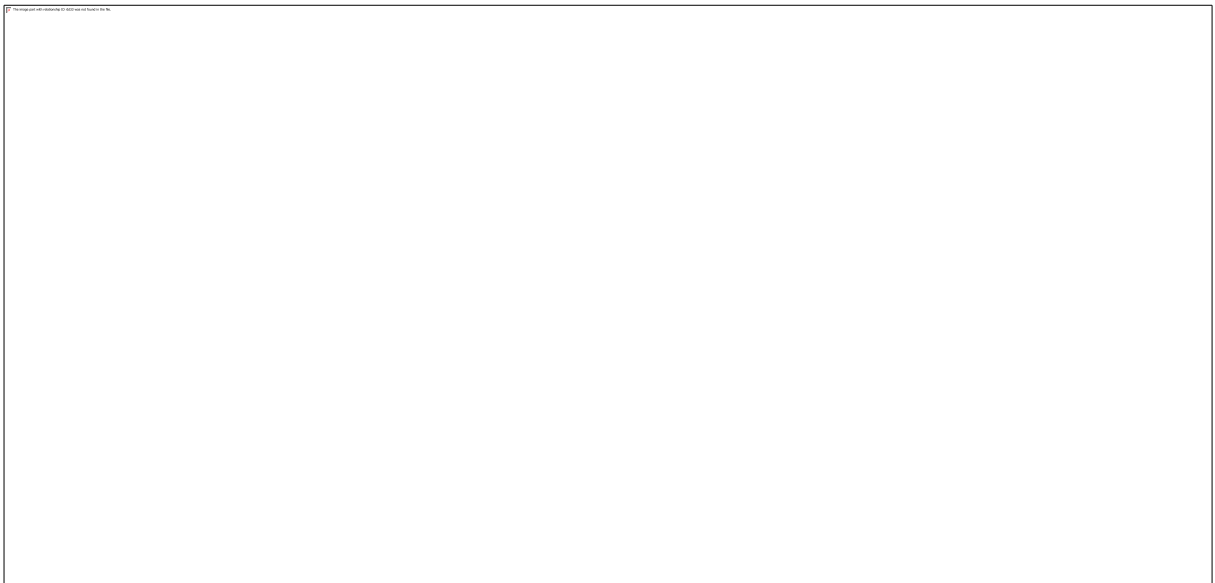
Inspeção 03 (Risco Alto). O resultado pode ser visualizado na Figura 20 e foram validados pelos especialistas e julgados adequados para a situação analisada.

**Figura 20 - Simulação 04 - Fuzzy + Fuzzy 2.**



**Simulação 05:**  $R1 = 0,02$   $R2 = 2$   $R3 = 2$  e  $COR = 1$   $C2H6 = 1$  mostrando como resultado  $DESCARGA = 9,11$  e  $RISCO = 0,863$ . De acordo com a base de regra o resultado demonstra que o equipamento está com o estado FTma700 (Falha térmica  $>700^{\circ}C$ ) e Inspeção 05 (Risco Muito Alto). O resultado pode ser visualizado na Figura 21 e foram validados pelos especialistas e julgados adequados para a situação analisada.

**Figura 21 - Simulação 05 - Fuzzy + Fuzzy 2.**



## 6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados gerados pela solução foram satisfatórios, considerando que os testes foram validados pelos especialistas da Eletronorte. Constatou-se que a abordagem *Fuzzy* pode ser um valioso instrumento para utilização na solução de problemas em ambientes de incerteza. A solução proposta pode ser adaptada a qualquer SEP, podendo auxiliar o processo de programação de inspeções em transformadores de alta potência (500kv), por meio da Análise de Gases Dissolvidos no óleo isolante, obtidos pela técnica da Cromatografia Gasosa e da análise físico-química do óleo.

É importante destacar que o uso da Análise Fatorial buscando identificar a inter-relação simultânea dos parâmetros físico-químicos do óleo, dos gases e das condições ambientais no momento da coleta foi fundamental no processo de aquisição do conhecimento sobre o problema. Relações importantíssimas, como a que constatou que se o gás etano aumenta a rigidez dielétrica diminui e o fator de potência 25kv (PF25) aumenta, puderam ser comprovadas.

A contemplação da análise físico-química do óleo isolante agregou considerável valor à proposta da norma de diagnósticos indicados pela NBR 7274. Além disso, com o conhecimento tácito de especialistas da área, pode-se ampliar a base de regras oriundas da referida norma técnica. Desta forma, qualquer SEP que realiza diagnóstico através da NBR 7274, poderá inferir um diagnóstico mais preciso, uma vez que as novas regras propostas abrangem todos os possíveis casos.

No estudo, foi possível constatar que as ferramentas da inteligência computacional podem ser utilizadas nas mais variadas áreas do conhecimento humano, com destaque na construção de soluções para problemas relacionados à área das engenharias que envolvam variáveis com domínios imprecisos. Os resultados identificaram correlações importantes entre os gases e os fatores físico-químicos, demonstrando que um influencia sobre o resultado do outro. Outra observação detectada foi no método que o laboratório se baseia para diagnosticar os transformadores de potência, a norma NBR 7274, que não contempla todos os resultados identificados. Desta forma, desenvolvemos uma nova proposta, incluindo as correlações identificadas.

Como propostas para trabalhos futuros, seria interessante implementar uma série temporal com o “Estimador M” para diagnosticar o nível das taxas dos gases e verificar qual a

situação dos mesmos para estimar, de forma preventiva, o estado operacional do transformador. Agregando as séries temporais, poderemos buscar como resultado as divergências nos valores. Logo, a expansão do método proposto contemplando essa propriedade agrega valor ao método, podendo melhorar a credibilidade nos diagnósticos dos transformadores.

## REFERÊNCIAS

- ABB – CATÁLOGO TÉCNICO. **Transformadores de Potência e Reatores de Derivação**. [s. l.: s. n.], 1999.
- AGORIS, P. D. et al. Técnicas de Detecção On-line de Descargas Parciais. In: **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo, n. 394, p. 132-141, jan. 2007.
- AGUIAR, H. **Lógica Difusa: aspectos práticos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1999.
- AQUINO, R. B. et al. Sistema inteligente de manutenção preditiva de transformadores de potência. In: **Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL**, Brasília/DF, n. 4, p. 74-75, ago. 2011.
- BECHARA, R. **Análise de falhas em transformadores de potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e Automação Elétricas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/SP, 2010.
- BOJADZIEV, G. & BOJADZIEV, M. **Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications**. Singapore: World Scientific, 1996.
- BORGES, P. S. S. Lógica Fuzzy e suas Aplicações. In: IX CICLO DE CURSOS E PALESTRAS DA ENGENHARIA ELÉTRICA, 2003, UFSC, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis/SC, 2003.
- BOZZINI, C. et al. Detection of and research for the characteristics of an incipient fault from analysis of dissolved gases in the oil of an insulation. In: **Electra**, n. 42, abr.1975.
- CASS, Q. B.; DEGANI, A.L.G. **Desenvolvimento de métodos por HPLC fundamentos, estratégias e validação**. São Carlos: EdUFSCar, São Paulo/SP, 2001.
- CELG – CENTRAIS ELÉTRICAS DE GOIÁS S/A. **Introdução à Cromatografia como Técnica de Manutenção Preditiva**. Divisão de Engenharia de Manutenção, Goiânia/GO, 1992.
- COSTA, S. & BRANDÃO JÚNIOR, A. F. A Manutenção dos Transformadores de Potência Baseada em Parâmetros de Monitoramento. In: **Contexto Radial**, São Paulo/SP v. 11, p. 30-37, mai. 2009.
- COX, E. The Fuzzy Systems Handbook: the practitioner's guide to building, using, and maintaining Fuzzy systems. In: **Academic Press Professional, San Diego, CA, USA** v.1 p. 615, jan. 1994.
- DINIZ, A.; NOGUEIRA, T; ASSUNÇÃO, J. Classificação de Transformadores de Potência baseado na Análise de Gases Dissolvidos no óleo isolante. In: IX CONGRESSO



BRASILEIRO DE REDES NEURAI/INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL, 2012, Ouro Preto, **Anais...** Ouro Preto/MG, 2012. p. 8-10.

DÖRNENBURG, E. & GERBER, O. E. Analysis of Dissolved and Free Gases for Monitoring Performance of Oil-Filled Transformers. In: **The Brown Boveri Review**, Alemanha, v. 54, n. 213, p. 15-17, 1997.

DUVAL, M. A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers. In: **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v.18, n. 3, p. 8-18, 2002 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=57>>.

DUVAL, M. Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer. In: **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 5, n. 6, p. 22-27, 1989. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=57>>.

FALLOU B. et al. Application of Physico-Chemical Methods of Analysis to the Study of Deterioration in the Insulation of Electrical Apparatus. In: **International Council on Large Electric Systems**, CIGRE, 1970.

FUJIMOTO, R. Y. **Diagnóstico automático de defeitos em rolamentos baseado em lógica Fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2005.

HAIR, J. F. et al. **Multivariate data analysis**. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

HELL, M. B. **Sistemas de Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência Utilizando Análise de Gases Dissolvidos e Técnicas de Inteligência Computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2002.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

KELLY, J. J. Transformer fault diagnosis by dissolved-gas analysis. In: **IEEE Transaction on Industry Applications**, v. IA-16, n. 6, p. 777-782, nov. 1980. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4503871>>.

KLIR, G. J. & YUAN B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

LAPWORTH, J. A. Transformers Reliability Surveys. In: **Revista Electra**, n. 227, p. 10-14, ago. 2006.

LIMA, S. E. U. et al. Diagnóstico de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência. In: XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado. **Anais...** Gramado/ RS, 2006.

MARQUES, A. P. **Eficiência Energética e Vida Útil de Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo Mineral Isolante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO, 2004.

MORAIS, D. R. **Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2004.

NASCIMENTO JÚNIOR, N. T. do. **Uma metodologia para monitoramento das condições operativas de Transformadores de Potência e análise de tendências baseada em lógica Fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Maranhão. São Luis/MA, 2010.

NBR 7274. **Guia de interpretação da análise dos gases livres e dissolvidos**. ABNT, 1982.

NEGNEVITSKY, M. **Artificial Intelligence: a guide to Intelligent Systems**. 2. ed. [s. l.]: Pearson Education; Addison Wesley, 2005.

NÉMETH, B. et al. Transformer condition analyzing expert system using Fuzzy neural system. In: CONFERENCE RECORD OF THE 2010 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, San Diego/CA, 2010. p. 1-5.

NUNO, M. D. S. & SOUZA, B. C. T. **Fuzzy Controls in Mechatronics**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Informática) – Universidade de Coimbra, 2003.

OLIVEIRA, E. M. **Cromatografia Gasosa como Instrumento de Manutenção Preventiva de Transformadores de Potência**. Monografia (Curso de Químico Tecnológico de Processos Agroindustriais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Goiânia/GO, 2004.

PEREIRA, V. G. **Controle automático de adição de  $AlF_3$  em cubas de redução de alumínio, usando lógica Fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará. Belém/PA, 2005.

RANDY, D. S. et al. Power Transformer Fault Diagnosis, IEEE PES WM. In: **Panel Session**, New York, 5 feb. 1977.

ROGERS, R. R. UK Experience in the interpretation of incipient faults in power transformers by dissolved gas-in-oil chromatographic analysis. In: MINUTES OF FORTY-SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE OF DOBLE CLIENTS, USA, 1975.

SANTOS, L. T. B.; VELLASCO, M; TANSCHKEIT, M. **Sistema de Apoio à Decisão para o Diagnóstico de Transformadores de Potência**. Belém/PA: SBSE. 2010.

SOUZA, D. C. P. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO, 2008.

TEODORO, F. H. Desenvolvimento de um sistema de inferência nebulosa para detecção e diagnóstico de falhas em transformadores de potência. In: XIII ERIAC DÉCIMO TERCER ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ. Puerto de Iguazú – Argentina, 2009.

TURBAN, E. & ARONSON, J. E. **Decision Support Systems and Intelligent Systems**. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

WANG, L. X. **A course in Fuzzy Systems and Control**. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

WANG, M. H. Extension neural network for power transformer incipient fault diagnosis. In: **IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution**. v. 150, n. 6, p. 679-656, nov. 2003.

YUN, Y.; ZHAO, X. Fault Diagnostic Method of Power Transformers based on Fuzzy CMAC Neural Network. In: **WASE International Conference on Information Engineering**, Beidaihe, 2010.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets, information and control**. In: Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338-353, jun. 1965.

ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral. In: **Revista Sba Controle e Automação**, Campinas, v. 16, n. 3, p.1-14, jun. 2005.