

Sistema Inteligente de Manutenção Preditiva de Transformadores de Potência: PREDITRAFO

Ronaldo R. B. de Aquino, Milde M. S. Lira, Agnaldo. M. de S. Silva, Viviane K. Asfora
Heldemarcio L. Ferreira e Taciana Filgueiras

Resumo – Este artigo descreve o produto final de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), desenvolvido pela equipe do Laboratório Digital de Sistema de Potência (LDSP) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), o qual resultou em um software para diagnosticar falhas incipientes em transformadores de potência através da análise cromatográfica do óleo isolante, denominado de PREDITRAFO. O PREDITRAFO irá auxiliar os engenheiros na tomada de decisão da realização ou não da manutenção preditiva do transformador. O software faz uso das normas ROGERS e IEC 599, e a partir delas utiliza a lógica fuzzy para diagnosticar os prováveis defeitos em ação num determinado transformador. O PREDITRAFO foi avaliado para situações onde as normas anteriores nada indicavam e mostrou-se eficaz indicando uma ou mais falhas incipiente que foram confirmadas algum tempo depois pelas próprias normas. Além disso, apresentou máximo desempenho para os defeitos tabelados.

Palavras-chave – Falhas Incipientes, Lógica Fuzzy, Transformadores.

I. INTRODUÇÃO

Em virtude do grande crescimento do setor elétrico onde as concessionárias de energia recebem mais de acordo com o aumento na sua disponibilidade operacional, é de caráter fundamental a continuidade ou a disponibilidade de operação dos diversos equipamentos a qualquer momento. Além disso, é imprescindível a antecipação da ocorrência de uma falha, pois afora os maiores prejuízos para a empresa em reparar o equipamento falhado, a ocorrência de falha do equipamento penaliza também a empresa através de multas elevadas e denigre a imagem da mesma junto à sociedade. Sendo assim, verifica-se que a decisão do especialista da engenharia de manutenção em manter operando ou não um dado equipamento é de suma importância e deve assim ser bem balizada.

O diagnóstico de um transformador é obtido com base na avaliação dos resultados apresentados por cada análise cro-

matográfica do equipamento e também na evolução da taxa de gases das últimas amostras. Um especialista analisando essas duas conformidades informa que o equipamento está ou não satisfatório. Desta forma, o equipamento pode permanecer em operação ou ser reavaliado para confirmar o diagnóstico. Se após a nova análise cromatográfica, algum defeito no transformador seja confirmado, opta-se pela retirada do mesmo de operação, encaminhando-o para uma inspeção interna e posterior reparo; caso contrário, o transformador é mantido em operação.

Um transformador em operação está sujeito aos estresses térmicos e elétricos, os quais podem destruir o material isolante, liberando assim produtos gasosos. Os gases de acordo com a análise cromatográfica do óleo isolante contêm concentrações (PPM por volume) de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, metano, acetileno, etano, etileno, monóxido de carbono e dióxido de carbono. A análise dos gases dissolvidos em óleo – DGA (Dissolved Gas Analysis) – pode determinar a condição dos transformadores a partir das concentrações destes gases dissolvidos no óleo isolante, taxa de geração dos gases, razão específica de gases e concentração total de gases combustíveis no óleo.

Diante do exposto, verifica-se a grande importância da aplicação de procedimentos automatizados incluindo a utilização de técnicas de Inteligência Artificial em conjunto com softwares adequadamente desenvolvidos para detectar falhas incipientes nos equipamentos do sistema de potência, auxiliando o Engenheiro de Manutenção na sua tomada de decisão.

Desta forma, num projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), parceria UFPE-CELPE, foi desenvolvida uma ferramenta computacional capaz de armazenar os laudos fornecidos pelas empresas contratadas pela CELPE e, a partir das concentrações gasosas fornecidas nestes laudos, estimar o defeito corrente no interior do transformador.

No processo de armazenamento anterior utilizado pela CELPE, os laudos eram armazenados de forma física em pastas identificadas pelo número de série do transformador e continham papeis impressos com os diagnósticos do transformador ao longo de sua vida. Caso houvesse necessidade de consultar o histórico de análises de um determinado transformador era necessário encontrar a pasta referente a esse transformador. Estas pastas foram à base para a construção do banco de dados digital, onde todos os laudos contidos nas pastas foram digitalizados e os dados considerados de maior importância, utilizados para elaborar o banco de dados do sistema PREDITRAFO.

O sistema computacional do PREDITRAFO foi desenvolvido em MatLab® com todas as funções necessárias para

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

R. R. B. de Aquino, M. M. S. Lira, A. M. de S. Silva e V. K. Asfora trabalham na Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (e-mails: rrb@ufpe.br; milde@ufpe.br; agnaldomagnum@yahoo.com.br; vi-khoury@gmail.com).

H. L. Ferreira e T. Filgueiras trabalham na Companhia Energética de Pernambuco - Celpe (e-mail: heldemarcio@celpe.com.br taciana@celpe.com.br).

ser considerado um software amigável: interface gráfica; importação e exportação de dados para planilhas Excel compatíveis com as planilhas em uso na CELPE e base de dados integrada para permitir o acompanhamento do histórico dos resultados das análises cromatográficas através do sistema.

Título do projeto de P&D: Sistema Inteligente de Manutenção Preditiva de Transformadores de Potência. Código ANEEL do projeto: 0043-013/2006. Empresa que deu suporte financeiro: CELPE. Entidade executora: UFPE.

II. DIAGNÓSTICO DE FALHAS A PARTIR DA CONCENTRAÇÃO DOS GASES

A análise dos gases dissolvidos em óleo (DGA) determina a condição 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 e arcos são as três causas primárias associadas aos diversos tipos de falha.

Embora a análise de gases dissolvidos no óleo isolante dos equipamentos seja utilizada mundialmente a mais de vinte anos, ainda hoje é considerada como a melhor técnica preditiva para diagnosticar problemas internos nos transformadores.

A tabela I e a tabela II apresentam os possíveis diagnósticos identificados a partir das relações gasosas pelos métodos IEC [1] e ROGERS [2], respectivamente.

Tabela I. Diagnósticos Indicado pela IEC

Relação Gasosa			Diagnósticos
C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
< 0,1	$\geq 0,1$ < 1	< 1	Sem falha
< 0,1	$\geq 0,1$ < 1	≥ 1 < 3	Defeito térmico de baixa temperatura
< 0,1	< 0,1	< 1	Descargas parciais de pequena densidade de energia
< 0,1	> 3	< 1	Defeito térmico de baixa temperatura
< 0,1	> 3	≥ 1 < 3	Defeito térmico de média temperatura
< 0,1	> 3	> 3	Defeito térmico de alta temperatura
$\leq 0,1$ > 3	$\geq 0,1$ < 1	≥ 1 < 3	Descargas de energia reduzida
$\leq 0,1$ > 3	$\geq 0,1$ < 1	> 3	Descargas de alta energia
$\leq 0,1$ > 3	< 0,1	< 1	Descargas parciais de alta densidade de energia
> 3	$\geq 0,1$ < 1	> 3	Descargas de energia reduzida

Além dos métodos apresentados nas Tabelas I e II, existem muitos métodos de interpretação baseados na técnica DGA para diagnosticar a natureza da deterioração do trans-

formador, tais como, Duval, Dornenburg, entre outros, que foram desenvolvidos através de extensas investigações das relações entre os gases gerados e as falhas incipientes resultantes. Desses métodos, apenas o da IEC / IEC revisada e o Rogers / Rogers modificado apresentam também diagnósticos de normalidade para os equipamentos, além dos diagnósticos de problemas já indicados em parte pelos outros métodos, sendo assim os mais usuais.

Esses métodos são praticados pela maioria das empresas do setor elétrico e fabricantes de equipamentos, sendo de conhecimento comum e de validade comprovada em todo o mundo. Estes métodos são caracterizados por experiências, muitas vezes empíricas, que associam as formações de alguns gases chaves, ao principal gás gerado, além do tipo de falha incipiente, e de relações de gases combustíveis distribuídas em faixas de valores. Cada faixa é associada a um código numérico, e cada código indica diferentes tipos de problemas internos que já são tabulados e mais prováveis de existirem e de serem responsáveis por esta geração de gases.

Tabela II. Diagnósticos Indicado por ROGERS

$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	Diagnósticos sugeridos
>0,1 < 1	< 1	< 1	<0,5	Normal
$\leq 0,1$	< 1	< 1	<0,5	Descargas parciais - Corona
$\leq 0,1$	< 1	< 1	$\geq 0,5$	Descargas parciais - Corona envolvendo o papel
>0,1 < 1	< 1	≥ 3	≥ 3	Descargas Contínuas
>0,1 < 1	< 1	≥ 1	$\geq 0,5$	Arco com alta energia
>0,1 < 1	< 1	< 1	$\geq 0,5$ < 3	Arco com baixa energia
≥ 1	< 1	< 1	<0,5	Sobreaquecimento (<150°C)
≥ 1	≥ 1	< 1	<0,5	Sobreaquecimento (150 - 200°C)
>0,1 < 1	≥ 1	< 1	< 0,5	Sobreaquecimento (200 - 300 °C)
>0,1 < 1	≥ 1	≥ 1 < 3	<0,5	Sobreaquecimento de condutores
≥ 1 < 3	< 1	≥ 1 < 3	<0,5	Corrente de circulação no enrolamento
≥ 1 < 3	< 1	≥ 3	<0,5	Corrente de circulação no núcleo do tanque, sobreaquecimento em conexões.

Essas normas não são válidas para todas as possíveis combinações de concentrações gasosas e, em muitos casos,

não acusam nenhum diagnóstico do que possa estar acontecendo no transformador. Com o intuito de fornecer um diagnóstico compatível com as normas citadas, mesmo nos casos em que estas não forneçam nenhuma indicativa de diagnóstico, foi criada uma ferramenta que utiliza a técnica de Inteligência Artificial (IA), especificamente a Lógica Fuzzy.

III. CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

Muitos pesquisadores hoje acreditam que IA é uma tecnologia chave para o software do futuro. As pesquisas em IA estão relacionadas com áreas de aplicação que envolvem o raciocínio humano, tentando imitá-lo e realizando inferências.

A utilização de lógica fuzzy na indicação do tipo de falha incipiente em transformadores de potência a partir da DGA foi estudada por outros autores [3]-[4] e mostrou-se promissora. Além disso, devido à pequena quantidade de padrões em determinadas classes de defeito e por não existir necessidade de treinamentos subsequentes, ela se destaca entre os diversos tipos de IA, sendo, portanto, escolhida como máquina de inferência do sistema desenvolvido no PREDITRAFO [5].

A Lógica Fuzzy no problema em questão utiliza a pertinência das relações dos gases nas funções membros para indicar um provável diagnóstico estabelecido nas normas IEC e ROGERS. Essa técnica também permitiu aproximar os resultados para alguns diagnósticos, cujos limites da relação dos gases não estão tabelados nas normas.

A. Sistema de Inferência Fuzzy

Em linguagem computacional foi desenvolvido no Matlab® um script de implementação da lógica fuzzy, no qual é possível, a partir das relações dos gases contidos na análise cromatográfica do óleo isolante, fornecer um diagnóstico compatível com as normas IEC e ROGERS.

Em caso de limites de concentração de gases não tabelados, o Sistema de Inferência Fuzzy (SIF) é capaz de aproximar esta entrada para um diagnóstico, o qual indicará o provável diagnóstico do transformador. Este diagnóstico é comparado com laudos futuros quando a razão dos gases passa a ser novamente tabelados. Em vários casos analisados foi comprovado que o diagnóstico previsto pelo SIF coincidia com o diagnóstico tabelado, atestando a eficiência do sistema desenvolvido diante de relações de gases não tabelados nas normas.

B. Definição das Funções de Pertinência

O limite estabelecido para cada relação gasosa (C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 ou C_2H_4/C_2H_6) foi substituído por funções membros (ZERO, UM e DOIS). Portanto, a fuzzificação da relação dos gases nestas funções membros atribui valor de pertinência a cada valor das relações gasosas, tornando-as mais próximas possíveis do tabelamento pelas normas IEC e ROGERS. Desse modo, três funções membros foram criadas para cada relação gasosa conforme exemplificado na figura 1 para a relação dos gases C_2H_4/C_2H_6 . A parametrização destas curvas é quem define o sucesso do sistema e neste trabalho foi realizada de forma

heurística, ou seja, pela avaliação puramente empírica dos resultados.

Com base nestes limites foram também definidas as formas das funções. Por exemplo, para a relação C_2H_4/C_2H_6 , no lugar do limite $R < 1$ estabelecido pela norma, foi criada uma função membro “Zero” do tipo Zmf (curva polinomial assimétrica com abertura a esquerda). Os tipos das funções membros “Um” e “Dois” foram Gbellmf (curva generalizada em forma de sino) e Sigmf (curva polinomial assimétrica com abertura a direita), respectivamente. Assim, enquanto que pela codificação IEC há somente um valor para a relação C_2H_4/C_2H_6 (0, 1 ou 2), pela lógica fuzzy esta relação passa a ter valor real no intervalo fechado de zero a um.

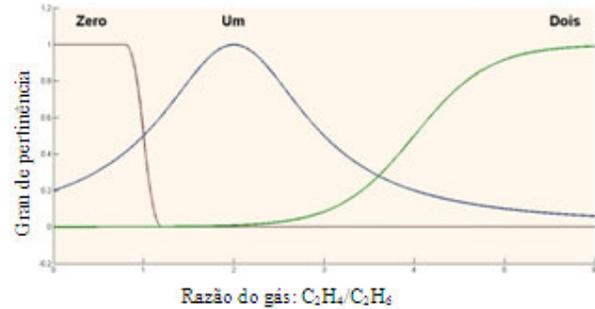


Figura 1. Funções membro da relação C_2H_4/C_2H_6 para norma IEC

As funções de pertinência para cada provável defeito indicam a probabilidade de um defeito está relacionado ao transformador, como segue:

$$F(0) = R_{1,zero} + R_{2,zero} + R_{3,zero} \quad (1)$$

$$F(1) = R_{1,zero} + R_{2,zero} + R_{3,um} \quad (2)$$

$$F(2) = R_{1,zero} + R_{2,um} + R_{3,zero} \quad (3)$$

$$F(3) = R_{1,zero} + R_{2,dois} + R_{3,zero} \quad (4)$$

$$F(4) = R_{1,zero} + R_{2,dois} + R_{3,um} \quad (5)$$

$$F(5) = R_{1,zero} + R_{2,dois} + R_{3,dois} \quad (6)$$

$$F(6) = \text{máximo}((R_{1,um} + R_{2,zero} + R_{3,um}) \text{ ou } (R_{1,dois} + R_{2,zero} + R_{3,dois})) \quad (7)$$

$$F(7) = R_{1,um} + R_{2,zero} + R_{3,dois} \quad (8)$$

$$F(8) = R_{1,um} + R_{2,um} + R_{3,zero} \quad (9)$$

onde, R_1 , R_2 e R_3 indicam as razões dos gases C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 e C_2H_4/C_2H_6 , respectivamente; $R_{n,Mem}$ indica a fuzzificação da relação R_n na função membro Zero, Um ou Dois. Por exemplo, para a relação $R_1=3,3333$ e funções membros dos tipos e parametrizações mostrados na Figura2, a fuzzificação $R_{1,Zero}=0$, $R_{1,Um}=0,1481$ e $R_{1,Dois}=0,8841$.

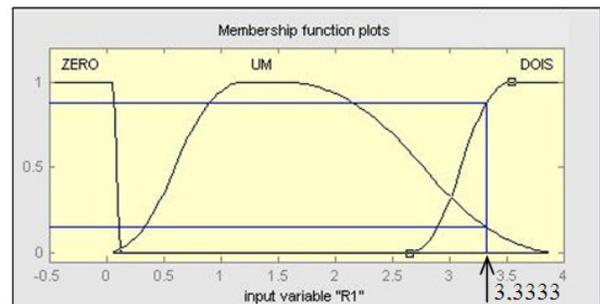


Figura 2. Fuzzificação da relação R_1 (C_2H_4/C_2H_6) nas funções membros

Zero, Um e Dois.

O diagnóstico final é obtido somando-se os valores de pertinência de cada função membro referente à relação gasosa de cada defeito. Por exemplo, o resultado do provável defeito F(0) (sem falha) é a soma da probabilidade da função membro “Zero” para as três relações gasosas (1) que fornece a probabilidade da presença desse defeito no transformador.

Este processo é repetido para todos os defeitos (1)-(9) e o defeito corrente no transformador é o defeito de maior probabilidade. Caso duas funções apresentem valores máximos iguais, o resultado é indicado por dois tipos de defeitos com probabilidades iguais de ocorrerem.

IV. PREDITRAFO

O PREDITRAFO é um software desenvolvido para auxiliar a tomada de decisão de se realizar ou não a manutenção preditiva dos transformadores de potência, informando os prováveis defeitos que originaram determinada concentração de gases. Para isso, o PREDITRAFO utiliza um SIF baseado nos diagnósticos das normas IEC e ROGERS (IEEE).

O PREDITRAFO dispõe de várias funcionalidades que facilitam o dia a dia do usuário, tais como:

- Armazenar e exibir o histórico de todas as falhas ocorridas em um transformador, bem como as análises cromatográficas realizadas no mesmo;
- Facilitar a consulta dos laudos de um transformador;
- Construir gráficos para facilitar o acompanhamento da evolução dos gases;
- Imprimir relatório com gráficos de acompanhamento do transformador;
- Fornecer um diagnóstico por meio do sistema de inferência fuzzy mesmo quando as concentrações de gases não se encontrarem tabeladas pelas normas ROGERS e IEC 599.

O fluxograma e a tela principal do PREDITRAFO são apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

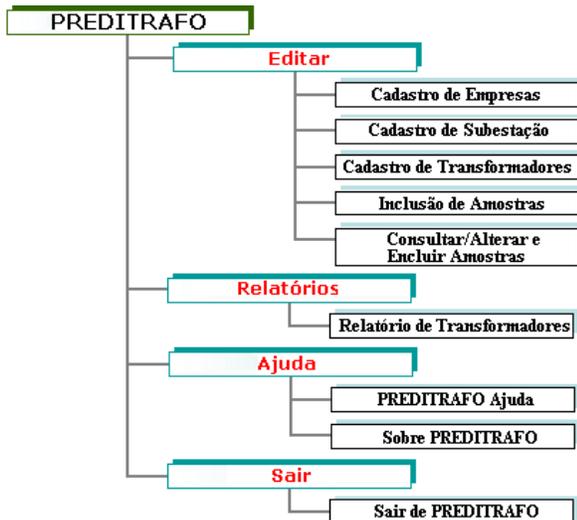


Figura 3. Fluxograma do PREDITRAFO



Figura 4. Tela Principal do PREDITRAFO

Para melhor compreensão do funcionamento do software, serão apresentadas a seguir as principais alterações que podem ser realizadas no mesmo.

A. Alimentação do Banco de Dados

O banco de dados do sistema é constituído dos relatórios de análise cromatográfica fornecido por diferentes empresas, cuja inserção dos dados é realizada pelo usuário em quatro etapas de cadastramento: empresa, subestação, transformador e inclusão de amostra.

Uma vez cadastradas, as informações são armazenadas no banco de dados, bastando selecioná-las para futuras inclusões de amostras.

Todas as inserções no banco de dados são feitas através do menu Editar. O cadastro de empresas, transformadores e subestação é realizado de forma simples e direta, necessitando apenas do preenchimento de informações contidas em cada tela de cadastro.

A inclusão de amostra na tela da Figura 5 é um pouco mais complexa, pois depende de todas as relações gasosas apresentadas no relatório de análise cromatográfica fornecido pelas empresas.

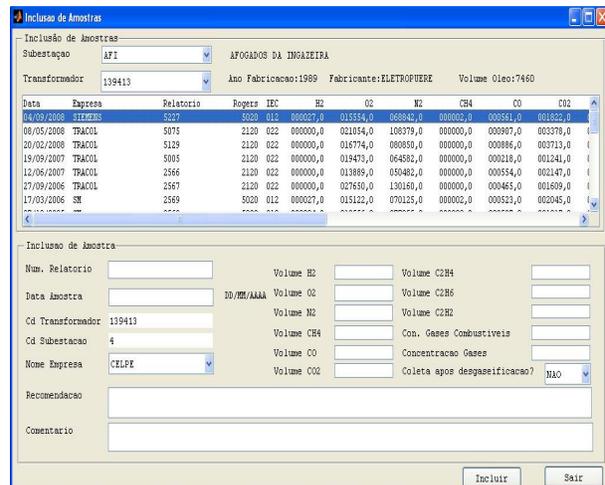


Figura 5. Tela de inclusão de amostra

Para iniciar o preenchimento da tela é necessário primei-

ramente selecionar a subestação, depois o transformador para então inserir os dados contidos no laudo, tais como: o número do relatório, a data, o nome da empresa que forneceu o laudo, volume dos gases, recomendações e comentários da empresa.

Nesta tela deve-se informar se a coleta do óleo foi feita ou não após degaseificação. Esta informação se encontra nos comentários da empresa responsável pela análise.

Para evitar a inclusão de laudos repetidos, o campo "Num. Relatório" não se repete caso a amostra possua o mesmo "Nome Empresa". Se isto ocorrer, um aviso, conforme exibido na Figura 6, mostrará em qual transformador e subestação está localizado o número do relatório repetido.



Figura 6. Erro na inclusão de amostra

B. Consulta do Banco de Dados

Com exceção do item amostras, todas as consultas de subestação, empresa e transformadores podem ser feitas nas suas respectivas telas de cadastro. A tela consulta de amostras apresentada na Figura 7 é realizada numa tela específica para que seja possível visualizar todas as informações referentes à análise em determinada data, inclusive os diagnósticos fornecidos pelas normas ROGERS e IEC e pelo FIS, sistema de inferência fuzzy desenvolvido.

Caso os valores das razões dos gases se encontrem tabelados nas normas, o diagnóstico pelo FIS e pelas normas coincidirá; caso contrário, o diagnóstico será indicado apenas pelo FIS como sendo aquele que mais se aproxima de um estabelecido pelas normas.

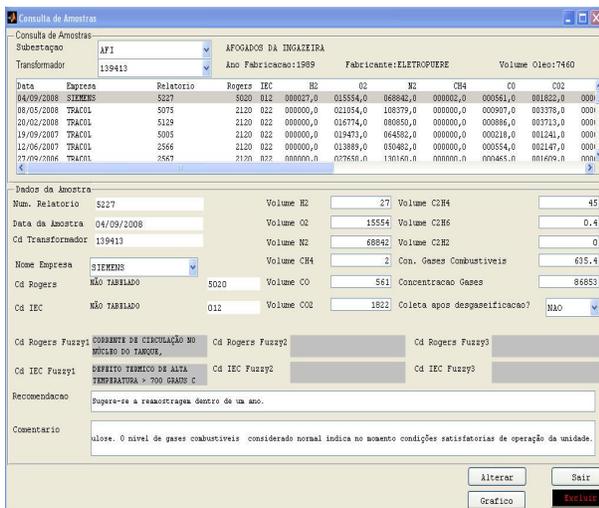


Figura 7. Tela de consulta de amostras

Para se alterar as informações do banco de dados, utiliza-se a tela de consulta, na qual os campos desejados devem ser selecionados, modificados e, por fim, alterados, clicando-se no botão Alterar. Assim, o banco de dados é atualizado, a-

justando-se aos novos valores.

Na tela de consulta de amostras é possível também gerar os gráficos de acompanhamento da evolução dos gases.

C. Exclusão do Banco de Dados

A exclusão é feita nas telas utilizada para cadastro e na tela de consulta. Alguns requisitos devem ser atendidos na exclusão de alguns dados do sistema. Por exemplo, para excluir uma empresa é necessário que nenhum laudo de transformador esteja associado a ela. Isso acontece para evitar que existam laudos em que a empresa não esteja especificada. O mesmo acontece para exclusão de transformadores e subestações.

Caso essa exigência não seja atendida, uma mensagem de erro será exibida informando que o registro não pôde ser excluído.

D. Histórico de Transformadores

Esta funcionalidade do PREDITRAFO engloba todo o banco de dados do sistema, permitindo que o usuário possa acompanhar a evolução dos gases presentes no transformador.

O histórico pode ser visto em forma de consulta, em gráfico (Figura 8) ou gerando um relatório completo de um determinado transformador.

Nesta mesma tela também é possível visualizar os diagnósticos fornecidos pelas normas IEC e ROGERS, assim como pelo Sistema de Inferência Fuzzy.

O gráfico de acompanhamento do transformador pode ser visualizado clicando no botão Gráfico da tela mostrada na Figura 7. Realizado este procedimento, os gráficos de acompanhamento dos gases deste transformador serão apresentados conforme mostra Figura 6. Além dos gráficos dos gases mostrados na Figura 6, outros gráficos também são apresentados contendo informações dos gases C_2H_4 , C_2H_6 , CO , CO_2 , C_2H_2 e a razão dos gases CO_2/CO .

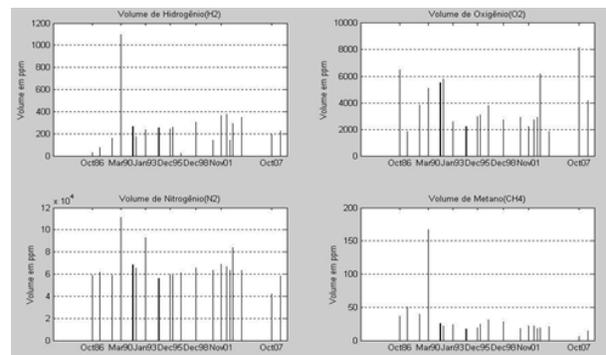


Figura 8. Gráficos de acompanhamento dos gases H_2 , O_2 , N_2 e CH_4

Os gráficos de acompanhamento podem ser visualizados tanto no menu de Relatório, quanto no sub-menu consultar / Alterar ou Excluir amostra do menu Editar.

Para gerar relatórios existe um sub-menu específico denominado de Relatório de Transformadores que se encontra no menu Relatório.

E. Relatórios de Acompanhamento

Primeiramente, deve-se escolher o transformador que se deseja acompanhar através da subestação na qual ele se en-

contra no momento.

A Figura 9 mostra a tela de Relatório de Transformadores.

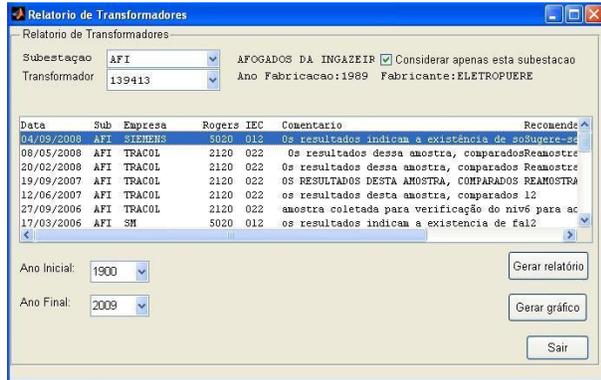


Figura 9. Tela de Relatório de Transformador

Para gerar o relatório, cujo formato é rtf, é necessário apenas escolher o ano de início e fim das análises a serem exportadas.

O sistema permite escolher o relatório contendo todas as amostras realizadas no transformador, ou apenas as realizadas na subestação onde ele se encontra atualmente.

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir das relações dos gases contidos na análise cromatográfica do óleo isolante de um transformador de potência, a lógica Fuzzy fornece um diagnóstico compatível com os das normas IEC e ROGERS. Os diagnósticos, cujos limites de concentração dos gases não possuem tabelamento através das normas, são aproximados para um ou mais diagnósticos tabelados, já que podem existir falhas simultâneas ocorrendo no transformador.

As Tabelas III e IV expressam a quantidade de erros com a aplicação do SIF quando avaliada pelas normas IEC e Rogers, respectivamente. As colunas 2 e 3 destas tabelas apresentam o total de dados analisados por tipo de falha e o total de laudos mal diagnosticados pelo sistema, respectivamente.

Tabela III. Resultados pela norma IEC

Diagnóstico IEC	Nº de amostras	Erro percentual (%)
Sem falha	573	0,00
Defeito térmico de baixa temperatura	436	0,00
Descargas parciais de pequena densidade de energia	237	0,00
Defeito térmico de baixa temperatura	815	0,00
Defeito térmico de média temperatura	208	0,00
Defeito térmico de alta temperatura	232	0,00
Descargas de energia reduzida	143	0,00
Descargas de alta energia	9	0,00
Descargas parciais de alta densidade de energia	144	0,00

Tabela IV. Resultados pela norma ROGERS

Diagnóstico ROGERS	Nº de amostras	Erro percentual (%)
Normal	200	0,00
Descargas parciais - Corona	98	0,00
Descargas parciais - Corona envolvendo o papel	15	0,00
Descarga contínua	89	0,00
Arco com alta energia	89	0,00
Arco com baixa energia	13	0,00
Sobreaquecimento (<150°C)	285	0,00
Sobreaquecimento (150 - 200°C)	352	0,00
Sobreaquecimento (200 - 300 °C)	371	0,00
Sobreaquecimento de condutores.	276	0,00
Corrente de circulação no enrolamento	131	0,00
Corrente de circulação no núcleo do tanque, sobreaquecimento em conexões	138	0,00

É possível observar a partir destes resultados que a ferramenta utilizada foi capaz de acertar todos os casos que coincidem com as normas. Ou seja, adotando-se como critério de validação os laudos fornecidos pelas normas IEC e Rogers, a ferramenta desenvolvida acertou todos os casos tabelados.

Além disso, o sistema foi também capaz de fornecer algum laudo, mesmo quando as normas nada confirmavam.

Na Tabela V é mostrada uma sequência de diagnósticos DGA para um caso real de um transformador de 15 MVA e 69 kV, alocado na subestação da Ilha do Retiro/PE.

Como se pode verificar nesta tabela, inicialmente a análise cromatográfica do óleo através da norma IEC não era conclusiva sobre um possível defeito no transformador. Entretanto, o SIF desenvolvido sempre acusava o defeito com maior probabilidade de estar ocorrendo. A cada ano, era realizada a análise cromatográfica, e apenas após seis anos o laudo foi decisivo, indicando uma descarga parcial de pequena densidade de energia, falha esta já acusada pela SIF desde a primeira amostra.

Após a desgaseificação do óleo isolante, ocorrida no ano de 1999, houve um novo crescimento na taxa dos gases e novamente o método de análise pela IEC não conseguiu identificar a falta, enquanto que o SIF indicava defeito térmico de baixa temperatura. Com o passar do tempo, tanto o SIF quanto a IEC mostraram uma evolução do defeito de baixa temperatura (< 150 °C) para alta temperatura (>700°C).

Apesar de muito útil, a norma da IEC não é eficaz em todos os casos. Na Tabela V, observa-se que em uma transição entre duas faltas térmicas, a IEC deixa de apontar um diagnóstico, enquanto o SIF desenvolvido continua mostrando a transição entre os defeitos.

Esta qualidade do sistema PREDITRAFO de apresentar um diagnóstico, mesmo quando as normas nada indicam, é

de extrema importância, pois substitui a falta de informação por um provável diagnóstico caracterizado pela sua probabilidade de ocorrência.

Tabela V. Histórico dos diagnósticos do trafo 15 MVA/69 kV alocado na subestação da Ilha do Retiro

Data da amostra	Diagnósticos IEC	Diagnóstico do SIF
01/03/2007	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
06/02/2006	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
25/02/2005	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
18/02/2004	Não Tabelado	Descargas Parciais de Pequena densidade de energia
06/08/2003	Não Tabelado	Descargas Parciais de Pequena densidade de energia
28/06/2002	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
08/04/2002	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
10/10/2001	Não Tabelado	Defeito térmico de baixa temperatura (< 150°C)
07/08/2000	Não Tabelado	Defeito térmico de baixa temperatura (< 150°C)
30/08/1999	Não Tabelado	Descargas de energia reduzida
05/02/1999	Descargas parciais de pequena densidade de energia	Descargas parciais de pequena densidade de energia
15/12/1997	Descargas parciais de pequena densidade de energia	Descargas parciais de pequena densidade de energia
12/11/1996	Descargas parciais de pequena densidade de energia	Descargas parciais de pequena densidade de energia
10/10/1995	Não Tabelado	Descargas parciais de pequena densidade de energia
11/10/1994	Não Tabelado	Descargas parciais de pequena densidade de energia
19/10/1993	Não Tabelado	Descargas parciais de pequena densidade de energia
23/10/1992	Não Tabelado	Descargas parciais de pequena densidade de energia
04/02/1992	Não Tabelado	Descargas parciais de pequena densidade de energia
11/03/1991	Não Tabelado	Descargas parciais de pequena densidade de energia

A Tabela VI apresenta o histórico dos diagnósticos de um outro trafo analisado, cujas amostras de gases em determinadas datas não provocaram nenhum diagnóstico pela norma IEC. Este transformador de 10 MVA/69 kV se localiza na subestação de Afogados da Ingazeira/PE.

Tabela VI. Histórico dos diagnósticos do trafo 10 MVA/69 kV alocado na subestação de Afogados da Ingazeira

Data da amostra	Diagnósticos IEC	Diagnóstico do SIF
12/6/2007	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
18/9/2006	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
17/3/2006	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
18/12/2005	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
12/9/2005	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
14/6/2005	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
3/3/2005	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
9/12/2004	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
28/9/2004	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
23/6/2004	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
16/3/2004	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
21/5/2003	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
3/7/2002	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
19/5/2001	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
26/5/2000	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
10/5/1999	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
3/12/1998	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
13/1/1998	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
14/7/1997	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
10/7/1996	Não Tabelado	Defeito térmico de alta temperatura (> 700°C)
7/6/1996	Defeito térmico de baixa temperatura (<150°C)	Defeito térmico de baixa temperatura (< 150°C)
7/6/1995	Defeito térmico de baixa temperatura (<150°C)	Defeito térmico de baixa temperatura (<150°C)
21/11/1994	Defeito térmico de baixa temperatura (<150°C)	Defeito térmico de baixa temperatura (<150°C)

Este caso estudado também mostra a capacidade do FIS implementado no PREDITRAFO em fornecer algum diagnóstico, cuja validade é confirmada posteriormente pelos laudos fornecidos pela empresa contratada pela CELPE para analisar os gases do óleo isolante dos seus transformadores.

VI. CONCLUSÕES

O PREDITRAFO encontra-se atualmente em uso pela Celpe e tem sido de grande utilidade no acompanhamento do óleo isolante dos transformadores de potência, sendo, principalmente, uma ferramenta auxiliar na tomada de decisão de uma manutenção preditiva.

Com a utilização do PREDITRAFO foi possível modificar o antigo sistema de armazenamento de laudos enviados pelas empresas contratadas pela Celpe para realizar a DGA.

O antigo sistema de armazenamento era realizado em meio físico através do empilhamento dos laudos impressos em pastas identificadas pelo código dos transformadores. Substituindo esse arcaico sistema pelo armazenamento no banco de dados do PREDITRAFO, tornou-se muito mais prático e simples o acompanhamento dos transformadores.

Os resultados do sistema de inferência fuzzy implementada no PREDITRAFO para identificar diagnósticos de transformadores é possível, de modo completo e confiável, apresentando os mesmos defeitos indicados pela norma IEC. As grandes vantagens deste método de inferência são sua estrutura simplificada e elevado desempenho.

O SIF desenvolvido também permitiu o estudo de caso de vários transformadores, cujos resultados foram validados por meio dos históricos dos laudos associados à DGA.

Como mostrado nos estudos de casos realizados, as transições entre dois tipos faltas podem ser acompanhadas pelo SIF, enquanto que através da norma IEC não é possível em alguns casos indicar nenhum diagnóstico.

Assim, neste trabalho fica evidente o grande potencial da Lógica Fuzzy para a classificação do tipo de falta incipiente em transformadores de potência imersos em óleo isolante, cujo SIF desenvolvido diagnosticou defeitos tabelados com 100% de acerto e forneceu estimativa de diagnósticos nos casos não tabelados pela norma IEC, que foram confirmados pelos laudos posteriores das análises cromatográficas.

A informação de um possível diagnóstico ajudará na tomada de decisão da equipe responsável pela manutenção e evitará que um defeito mais grave, tal como uma explosão, possa ocorrer no transformador, haja vista o custo e a importância vital de um equipamento desse porte no fornecimento de energia aos grandes centros de carga.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC) - "Interpretation the analysis of gases in transformer and other Oil-filled impregnated Electrical Equipment in Service" , CEI - IEC - 599, First Edition, 1978.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) – "Guide for the detection and determination of generated gases in oil-immersed transformers and their relation to the serviceability of the equipment", ANSI/IEEE C57.104-1978.
- [3] C. E. Lin, J. M. Ling, and C. L. Huang, "An Expert System for Transformer Faults Diagnosis and Maintenance Using Dissolved Gas Analysis", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 8, no.1, pp. 231-238, January 1993.
- [4] Q. Su, C. Mi., L. L. Lai, and P. Austin, "A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 15, no.2, pp. 593-598, May 2000. G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.
- [5] R. R. B. Aquino, M. M. S. Lira, T. Figueiras, H. L. Ferreira, O. Nóbrega Neto, A. M. S. Silva and V. K. Asfora, "A fuzzy System for Detection of Incipient Fault in Power Transformers Base on Gas-in-

Oil Analysis," apresentado na IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, Espanha, 2010.