

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

HENDERSON RODRIGUES MÉLE

**WEB SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO DE
AVARIAS EM TRANSFORMADORES POR MEIO
DE ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO
ISOLANTE**

São Carlos

2011

HENDERSON RODRIGUES MÉLE

**WEB SOFTWARE PARA
IDENTIFICAÇÃO DE AVARIAS EM
TRANSFORMADORES POR MEIO DE
ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS
NO ÓLEO ISOLANTE**

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

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos

2011

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M519w

Méle, Henderson Rodrigues.

Web software para identificação de avarias em transformadores por meio de análise de gases dissolvidos no óleo isolante. / Henderson Rodrigues Méle ; orientador Rogério Andrade Flausino -- São Carlos, 2011.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Web software on line. 2. Cromotográfica. 3. Óleo mineral. 4. Falhas transformadores. I. Título.

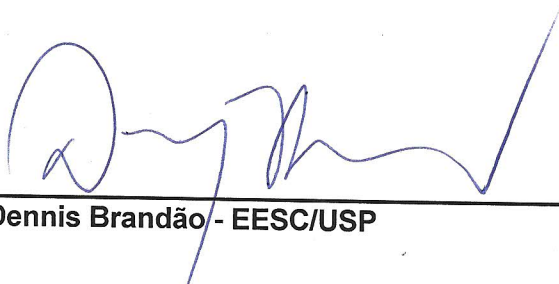
FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Henderson Rodrigues Méle

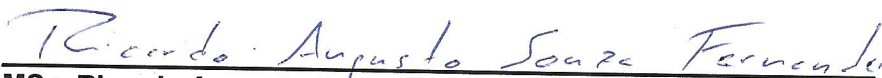
Título: "Web Software para Identificação de Avarias em Transformadores por Meio de Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 21/11/2011,

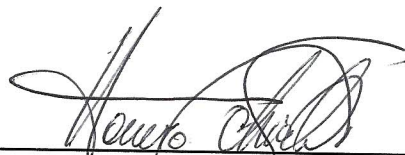
com NOTA 10,0 (dez, zero), pela comissão julgadora:



Prof. Dr. Dennis Brandão - EESC/USP



MSc. Ricardo Augusto Souza Fernandes - EESC/USP



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

Dedico este trabalho aos meus pais
Nivaldo e Tânia por tornarem possível
a realização de meus estudos e por
todo o apoio desde o início.

Resumo

No desenvolvimento deste trabalho o objetivo foi criar uma ferramenta capaz de realizar de uma só vez a análise de uma ou mais amostras de óleo de um transformador, comparando a falha prevista em métodos distintos. Além disso, seu acesso é facilitado por uma API para terceiros que a quiserem utilizar como parte integrante de seus softwares. As concentrações dos gases utilizados como dados de entrada para a ferramenta deve ser obtida através de análise cromatográfica do óleo mineral isolante dos transformadores. Uma versão completa e uma compacta mobile estão disponíveis online.

Palavras-chaves: web software online análise cromatográfica óleo mineral falhas transformadores

Abstract

In the development of this work the goal was to create a tool capable of performing a single analysis of one or more samples of oil from a transformer, comparing the expected fault in different methods. In addition, It access is facilitated by an API to third parties that want to use as part of their software. The concentrations of gases used as input data for the tool must be obtained by chromatographic analysis of the insulating oil of transformers. A full version and a compact mobile are available online.

Keywords: chromatographic analysis software online web mineral oil transformer fault

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Triângulo de Duval para Diagnóstico de Falhas	21
Figura 4.1 – Triângulo de Duval Mostrando Retas Auxiliares	33
Figura 5.1 – Interface Gráfica da Ferramenta Online	41
Figura 5.2 – Interface Gráfica da Ferramenta Online	42
Figura 5.3 – Resultado da Análise Através de Inserção Manual	43
Figura 5.4 – Plataforma <i>Mobile</i> – Tela Principal	45
Figura 5.5 – Plataforma <i>Mobile</i> – Resultados da Análise	45

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Normas Aplicadas nos Ensaios de Óleo Isolante	14
Tabela 2.2 – Códigos das Razões do Método de Rogers	16
Tabela 2.3 – Códigos de Falta do Método de Rogers.....	17
Tabela 2.4 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método de Rogers Estendido	17
Tabela 2.5 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método de Rogers Reduzido	18
Tabela 2.6 – Limites de Concentração para o Método de Doernenburg	19
Tabela 2.7 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método de Doernenburg.....	19
Tabela 2.8 – Códigos de Falta do Método IEC	20
Tabela 2.9 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método IEC	20
Tabela 2.10 – Limite de Concentração e Geração Para o Método de Duval.....	21
Tabela 4.1 – Códigos Definidos Para Cada Método	36
Tabela 4.2 – Lista de Variáveis a Serem Enviadas.....	36
Tabela 4.3 – Códigos de Erro da API	38
Tabela 5.1 – Dados de Entrada Manual	42
Tabela 5.2 – Dados de Entrada por Folha de Dados	43
Tabela 5.3 – Resultado da Análise Através de Envio de Folha de Dados.....	44

SUMÁRIO

1. Capítulo 1 Apresentação da Monografia	10
1.1. Introdução	10
1.2. Objetivos do Trabalho.....	11
1.3. Desenvolvimento Geral	11
2. Capítulo 2 Métodos de Identificação de Avarias em Transformadores.....	12
2.1. Introdução	12
2.2. Análise Cromatográfica do Óleo Mineral do Transformador.....	14
2.3. Métodos de Diagnóstico	15
2.3.1. Método de Rogers.....	16
2.3.2. Método de Doernenburg	18
2.3.3. Método IEC	19
2.3.4. Método de Duval	20
3. Capítulo 3 Detalhes da Ferramenta de Programação	23
3.1. Introdução	23
3.2. O que é o PHP	24
4. Capítulo 4 Uso do PHP Para Implementar os Métodos.....	26
4.1. Introdução	26
4.2. Classe Principal de Execução dos Métodos	28
4.2.1. Método de Rogers.....	28
4.2.2. Método de Doernenburg	30
4.2.3. Método IEC	32
4.2.4. Método de Duval	32
4.3. Classe Auxiliar de Ferramentas	34
4.4. API	34
4.4.1. Introdução	35
4.4.2. Entrada de Dados	35
4.4.3. Resposta da API	36
4.4.4. Exemplo de Utilização.....	38
5. Capítulo 5 Resultados.....	41
5.1. Telas do <i>Website</i>	41

5.2. Resultados de Análises	42
5.3. Plataforma <i>Mobile</i>	44
6. Capítulo 6 Conclusões.....	46
7. Referências Bibliográficas	47

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO DA MONOGRAFIA

Neste capítulo será apresentada uma introdução ao tema desenvolvido no trabalho, juntamente com os objetivos procurados e a forma como se dará o desenvolvimento do trabalho.

1.1. Introdução

O Brasil é o 10º maior consumidor de energia do mundo e o maior da América do Sul. Com isso, faz-se necessário um sistema de fornecimento de energia elétrica confiável e robusto capaz de suprir as necessidades com qualidade. É dessa forma que surge a necessidade de que o sistema seja mantido sempre com a manutenção adequada, utilizando para isso, dentre outras especificações como tempo de operação dos equipamentos, diversos sistemas de predição de falhas, atuando em todos os pontos da matriz energética no lado da geração, até o ponto final de distribuição. Evitando-se as falhas, o sistema opera corretamente, sem perturbações que poderiam causar danos aos equipamentos de consumidores, ocasionando gastos ao sistema energético.

Um ponto de extrema importância no sistema elétrico é o funcionamento dos transformadores. Estes equipamentos são responsáveis por funções fundamentais, desde as linhas de transmissão de alta tensão até a distribuição, tensões mais baixas, de energia para os consumidores finais. São os transformadores responsáveis por adequar as tensões em cada passagem de nível, uma vez que as tensões de geração e distribuição são geralmente muitas vezes mais baixas que as tensões de transmissão. Além disso, todo o fluxo de potência nesta conexão de diferentes tensões tem de passar pelo transformador, solidificando sua importância na operação do sistema elétrico.

Uma parte importante dos transformadores é sua isolação. Se for possível prever falhas neste componente, há uma chance de que a manutenção do

equipamento seja feita, evitando-se a falha. Alguns métodos de diagnósticos mediante previsão das mesmas não analisam a isolação e sim o funcionamento elétrico do transformador, mas apesar de detectarem falhas com grande exatidão, são mais complexos. Uma delas busca identificar possíveis avarias no transformador através de análise da resposta em frequência deste equipamento, fazendo verificação constante deste tipo de resposta. Outras abordagens correlatas, que também empregam o monitoramento das grandezas elétricas da unidade transformadora, baseiam-se na avaliação da função transferência do equipamento (ISLAM e LEDWICH, 1996), análise que só pode ser feita em um laboratório, com o equipamento completamente fora de operação.

Analisando-se a isolação dos transformadores, têm-se as metodologias de previsão de falhas baseadas na concentração dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante do equipamento, que são capazes de identificar tipos de falhas que interagem com o óleo, alterando suas propriedades e liberando gases no processo, que por serem produzidos em pequenas quantidades, ficam dissolvidos no óleo.

1.2. Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é criar uma ferramenta que seja capaz de realizar de uma só vez a análise de amostra única ou diversas amostras de óleo de um transformador, comparando a falta prevista em métodos distintos.

Além disso, esta ferramenta será disponível *online* e seu acesso deve ser facilitado a terceiros que a quiserem utilizar como parte integrante de seus *softwares*.

1.3. Desenvolvimento Geral

Este trabalho tem em sua composição cinco capítulos, sendo o primeiro introdutório. No Capítulo 2, as metodologias que serão utilizadas na ferramenta final são brevemente descritas. No Capítulo 3 é mostrado o funcionamento geral da linguagem de programação que será utilizada para implementar a ferramenta que é finalmente apresentada no Capítulo 4. No Capítulo 5, é apresentada a interface gráfica da ferramenta, assim como os resultados por ela produzidos. Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE AVARIAS EM TRANSFORMADORES

Neste capítulo serão apresentadas as principais formas disponíveis para identificação de falhas em transformadores de potência, explicitando o método de análise do óleo mineral isolante utilizado nestes equipamentos. A princípio uma curta introdução é apresentada da Seção 2.1, seguida pela descrição do método de análise cromatográfico na Seção 2.2. Por fim, na Seção 2.3 será detalhado o funcionamento de cada método utilizado neste trabalho com a finalidade de estimar falhas em transformadores, baseando-se na concentração de gases dissolvidos no óleo mineral isolante, obtidas através de análise cromatográfica deste material.

2.1. Introdução

Os óleos isolantes são substâncias resistentes a elevadas temperaturas e que possuem alta rigidez dielétrica, ou seja, são bons isolantes elétricos. Estes fluídos são utilizados em transformadores de potência com a intenção de se garantir o isolamento elétrico, extinguir possíveis descargas parciais e arcos elétricos e, além disso, servir como um meio de troca térmica permitindo a refrigeração das partes internas do equipamento.

Estes óleos são derivados do petróleo e são obtidos através de sua destilação fracionada. Suas características dependem basicamente do tipo do petróleo utilizado como matéria prima e do processo empregado em sua produção. Eles podem ser classificados segundo a sua constituição química em parafínicos e naftênicos. O primeiro, produzido a partir de petróleo de base parafínica e o segundo de petróleo de base naftênica.

Anos atrás, (IMAMURA, 2000) constatou:

[...] até o ano de 1920, o óleo parafínico possuía amplo uso, porém tinha aplicações restritas em regiões de inverno rigoroso, pois detinha um baixo ponto de fluidez. O óleo parafínico foi substituído então pelo óleo naftênico, pois o ponto de fluidez deste à temperatura de -40°C permitia seu uso em regiões de inverno rigoroso. Atualmente, devido à escassez de petróleo

naftênico (3% das reservas mundiais), o uso de óleo parafínico se torna cada vez maior. Para contornar as limitações advindas principalmente de seu ponto de fluidez foram desenvolvidos aditivos permitindo então que sejam utilizados em regiões de invernos rigorosos

Atualmente, a unidade da Petrobras responsável pela produção destes óleos é a LUBNOR, em Fortaleza - Ceará e os óleos produzidos nesta unidade são do tipo naftênico (PETROBRAS, 2009).

Portanto, nota-se que o tipo de óleo mais amplamente utilizado no país ainda é o naftênico, dado a natureza do petróleo encontrado nas reservas brasileiras.

Através de uma simples análise é muito difícil concluir se um óleo é do tipo naftênico ou parafínico. As relações de composição que são normalmente admitidas numa tentativa de identificação do tipo de óleo isolante (MILASCH, 1984).

Este óleo isolante naftênico é composto de uma mistura de hidrocarbonetos aromáticos em quase sua totalidade, além disso, também de alguns hidrocarbonetos em menores concentrações, como compostos de hidrogênio e enxofre, chamados de heterocompostos.

Recomenda-se para acompanhamento das condições operacionais do transformador, a realização dos ensaios apresentados na Tabela 2.1, a qual apresenta os ensaios pertinentes ao óleo isolante de transformadores com as respectivas normas. (FLAUZINO, 2004)

Além dos ensaios do óleo, feitos com transformador em operação, são também realizados, quando necessário, testes de isolamento, como por exemplo, fator de potência e resistência de isolamento, os quais exigem a desenergização da unidade. (FLAUZINO, 2004)

A análise cromatográfica gasosa, importante para a utilização da ferramenta descrita neste trabalho por ser responsável pela obtenção dos gases dissolvidos no óleo do transformador é a única da tabela que não pode ser feita no próprio local de instalação do transformador, pois necessita de uma técnica laboratorial como descrito na Seção 2.2.

Tabela 2.1 – Normas Aplicadas nos Ensaios de Óleo Isolante

Tipo de Ensaio	Norma Aplicada
Cor	ASTM D1524/1999
Densidade	NBR 7148/1992
Tensão Interfacial	NBR 6234/1965
Teor de Água	NBR 5755/1984
Índice de Acidez Total	ASTM D974/1980
Rigidez Dielétrica	NBR 6869/1989
Fator de Potência a 20° C	ASTM D924/1999
Estabilidade à Oxidação	NBR 10504/1988
Viscosidade Cinemática	NBR 10441/1998
Ponto de Anilina	ABNT MB299/1990
Ponto de Fulgor e Combustão	ABNT MB50
Grau de Polimerização em Papel Isolante	NBR 8148/2000
Análise Cromatográfica de Gases	NBR 7070/1981

2.2. Análise Cromatográfica do Óleo Mineral do Transformador

Cromatografia é um termo coletivo utilizado para referenciar um conjunto de técnicas de laboratório para a separação de misturas.

Cromatografia gasosa é um tipo comum de cromatografia utilizado em química analítica para separação e análise de compostos que podem ser vaporizados sem serem decompostos.

Também conhecida por cromatografia em fase-vapor ou cromatografia de partição gás-líquido, este procedimento é semelhante à destilação fracionada, já que ambos os processos separam componentes de uma mistura primária, baseando-se nos diferentes pontos de pressão de vapor. A diferença é que a destilação fracionada é utilizada normalmente para misturas em grandes escalas enquanto que a cromatografia gasosa pode ser realizada em micro-escalas, tornando-se ideal para o procedimento proposto neste trabalho.

Portanto, basicamente este processo consiste na separação dos gases dissolvidos em um óleo mineral analisado de um transformador em operação, podendo assim determinar suas respectivas concentrações em partes por milhão (ppm). Tendo-se

esta análise feita ao decorrer de um determinado período de tempo, pode-se então obter a taxa de geração em partes por milhão por mês (ppm/mês), necessária para a utilização de um dos métodos aqui descritos.

2.3. Métodos de Diagnóstico

Os transformadores são equipamentos de fundamental importância nos sistemas elétricos de potência. Quando colocado em operação, o fim de sua vida útil já está determinado pelo fabricante, juntamente com o ciclo de manutenções que garantirão este prazo.

Apesar dessa previsão, falhas no equipamento durante a operação podem diminuir esse tempo de vida útil, já que comprometerão a confiabilidade do equipamento. Portanto, é importante ter conhecimento do funcionamento desta deterioração no equipamento e ter a disposição ferramentas com precisão suficiente de forma a se prever as falhas e minimizar seus efeitos maléficos no equipamento.

O óleo deteriorado é aquele que apresenta produtos resultantes de sua oxidação, enquanto o óleo contaminado é aquele que apresenta água e outras substâncias estranhas que não fazem parte de sua composição (MILASCH, 1984).

O processo de degradação do óleo mineral pode ser apresentado em três fases distintas. A fase inicial caracteriza-se pela formação de peróxidos quimicamente instáveis, os quais liberam oxigênio e formam os compostos oxi-celulósicos com o papel isolante. A fase intermediária caracteriza-se pela formação de gases e finalmente, na fase final, a formação de borra, que geralmente consiste em uma substância resinosa resultante da polimerização a partir de ácidos e outros compostos químicos (SILVA, SOUZA, *et al.*, 2001).

Quando existem defeitos no interior do transformador, a interação com o óleo isolante causando sua decomposição gera diferentes tipos de gases em diferentes concentrações que ficarão dissolvidas nesse óleo. A partir da análise da relação entre esses gases e sua formação é possível identificar o tipo de defeito interno e a sua gravidade. Geralmente a identificação e quantificação dos tipos de gases são usadas para realização do planejamento de manutenção.

Deve-se adotar um método de interpretação dos valores das concentrações dos gases obtidos através de análise cromatográfica. Estes métodos contemplam o fato de que não somente falhas causam a criação desses gases, mas também a deterioração natural do óleo mineral isolante. A motivação dedicada a esta metodologia de identificação de falhas

em transformadores justificam-se pela quantidade de falhas possíveis de serem identificadas, bem como pela qualidade e confiabilidade dos resultados alcançados (HERMAN, SHENTON, *et al.*, 2001).

Dentre diversos métodos existentes, quatro serão abordados neste trabalho, o método de Rogers, método de Doernenburg, o método IEC e o método de Duval. Nas seções seguintes a metodologia de análise utilizada por eles é descrita.

2.3.1. Método de Rogers

O método de Rogers foi desenvolvido de forma empírica, analisando-se a falha em diversos transformadores e baseando-se na concentração dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante. O método não utiliza especificamente a concentração dos gases, mas sim cinco razões entre concentrações de cinco hidrocarbonetos diferentes, obtidas através de cromatografia gasosa.

Com as concentrações dos gases em mãos e as razões calculadas, a Tabela 2.3 é utilizada para que se determinem os códigos das falhas previstas pelo método.

Posteriormente, para que se determine a falha sugerida pelo método, combinam-se os códigos de falha obtidos anteriormente e com a Tabela 2.4 obtém-se a sugestão de diagnóstico do método de Rogers.

Chama-se aqui este método de Rogers Estendido, pois por outro lado, de acordo com a norma IEEE C57.104/2009, o método de Rogers pode ser definido de forma diferente. Além de utilizar somente três razões, diferente da forma anterior, as falhas detectadas são menos específicas. A Tabela 2.5 contempla o funcionamento deste método.

Nota-se que a quantidade de falhas detectadas por este método é reduzida comparando-se com a primeira forma do método de Rogers descrita. No entanto, ambas as formas podem ser aplicadas a fim de se obter uma maior confiabilidade do resultado.

Tabela 2.2 – Códigos das Razões do Método de Rogers

Razões	Códigos
CH_4/H_2	i
$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	j
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	k
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	l

Tabela 2.3 – Códigos de Falta do Método de Rogers

Código da Razão	Limites	Código da Falta
i	$\leq 0,1$	5
	$> 0,1; < 1,0$	0
	$\geq 1,0; < 3,0$	1
	$\geq 3,0$	2
j	$< 1,0$	0
	$\geq 1,0$	1
k	$< 1,0$	0
	$\geq 1,0; < 3,0$	1
	$\geq 3,0$	2
l	$< 0,5$	0
	$\geq 0,5; < 3,0$	1
	$\geq 3,0$	2

Tabela 2.4 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método de Rogers Estendido

i	j	k	l	Diagnóstico Sugerido
0	0	0	0	Deterioração Normal
5	0	0	0	Descarga Parcial
1-2	0	0	0	Leve Aquecimento $< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
1-2	1	0	0	Sobreaquecimento $150\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$
0	1	0	0	Sobreaquecimento $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
0	0	1	0	Sobreaquecimento do Condutor
1	0	1	0	Correntes Circulantes no Enrolamento
1	0	2	0	Correntes Circulantes no Núcleo e Tanque, sobreaquecimento das conexões
0	0	0	1	Arco de Baixa Energia
0	0	1-2	1-2	Arco de Alta Energia
0	0	2	2	Descargas Contínuas
5	0	0	1-2	Descarga Parcial

Tabela 2.5 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método de Rogers Reduzido

CH ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Diagnóstico Sugerido
< 0,1	> 0,1; < 1,0	< 1,0	Unidade Normal
< 0,1	< 0,1	< 1,0	Arco de Baixa Energia
>= 0,1; <= 3,0	>= 0,1; <= 1,0	> 3,0	Arco de Alta Energia
< 0,1	> 0,1; < 1,0	>= 1,0; <= 3,0	Térmica de Baixa Temperatura
< 0,1	> 1,0	>= 1,0; <= 3,0	Térmica < 700 °C
< 0,1	> 1,0	> 3,0	Térmica > 700 °C

2.3.2. Método de Doernenburg

O método de Doernenburg foi desenvolvido de forma empírica, assim como o método de Rogers, mas uma diferença significativa é a existência de limites mínimos de concentração dos gases para que o método possa ser aplicado. Estes limites estão representados na tabela Tabela 2.6.

De acordo com a norma IEEE C57.104/2009, a execução do método deve seguir alguns passos, após a obtenção da concentração dos gases por cromatografia gasosa.

Primeiramente, para o método se tornar válido, pelo menos a concentração de um dos gases deve ser igual ao dobro dos valores encontrados na tabela Tabela 2.6 e, além disso, pelo menos uma das concentrações dos gases restantes deve exceder os limites descritos na mesma tabela. Atendendo estes requisitos, é considerado que a unidade possui uma falha.

Posteriormente, quatro razões devem ser calculadas. São elas: CH₄/H₂, C₂H₂/C₂H₄, C₂H₂/CH₄, C₂H₆/C₂H₂. Pelo menos um dos gases em cada razão deve exceder os limites descritos na tabela Tabela 2.6, caso contrário os valores não são válidos para a utilização deste método.

A partir deste ponto, se as concentrações obtidas atendem aos requisitos dos passos anteriores, devem ser analisadas baseando-se na Tabela 2.7. Se todas as razões atenderem a uma falha específica, então o diagnóstico sugerido é válido.

Tabela 2.6 – Limites de Concentração para o Método de Doernenburg

Gás	Concentração (ppm)
H ₂	100
CH ₄	120
CO	350
C ₂ H ₂	35
C ₂ H ₄	50
C ₂ H ₆	65

Tabela 2.7 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método de Doernenburg

CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	C ₂ H ₂ /CH ₄	C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	Diagnóstico Sugerido
> 1,0	< 0,75	< 0,3	> 0,4	Decomposição Térmica
< 1,0	Insignificante	< 0,3	> 0,4	Corona – descarga de baixa intensidade
> 0,1; < 1,0	> 0,75	> 0,3	< 0,4	Arco – descarga de alta intensidade

Fica claro que o método de Doernenburg detecta menos falhas que o método de Rogers Estendido, mas as três formas aqui já descritas podem ser utilizadas em conjunto para uma melhor confiabilidade dos resultados.

2.3.3. Método IEC

Este método é originado do método de Rogers, com exceção da razão C₂H₆/CH₄ que foi removida já que sua utilidade é de apenas indicar as temperaturas limite de decomposição.

A metodologia de identificação da falha também é diferenciada. A análise das razões gera códigos, baseados na Tabela 2.8 que combinados farão a identificação da falha, baseado na Tabela 2.9.

Tabela 2.8 – Códigos de Falta do Método IEC

Código da Razão	Limites (ppm)	Código da Falta
i	< 0,1	0
	> 0,1; < 1,0	1
	> 1,0; < 3,0	1
	> 3,0	2
k	< 0,1	1
	> 0,1; < 1,0	0
	> 1,0; < 3,0	2
	> 3,0	2
l	< 0,1	0
	> 0,1; < 1,0	0
	> 1,0; < 3,0	1
	> 3,0	2

Tabela 2.9 – Diagnósticos Sugeridos Para o Método IEC

i	k	l	Diagnóstico Sugerido
0	0	0	Deterioração Normal
1	0	*	Descarga Parcial de Baixa Energia
1	0	1	Descarga Parcial de Alta Energia
0	1-2	1-2	Descarga de Baixa Energia
0	2	1	Descarga de Alta Energia
0	1	0	Falta Térmica < 150 °C
2	0	0	Falta Térmica 150 °C – 300 °C
2	1	0	Falta Térmica 300 °C – 700 °C
2	2	0	Falta Térmica > 700 °C

2.3.4. Método de Duval

O método de Duval é o mais complexo dos aqui apresentados. Além de impor limites mínimos, L1, para os valores das concentrações dos gases, o método exige o

conhecimento da taxa de geração dos gases, em ppm/mês, que deve exceder os limites G2, ambos os limites expressos na Tabela 2.10.

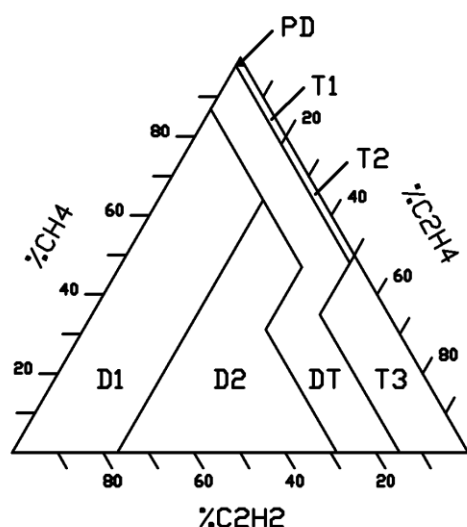
Diferentemente dos métodos apresentados anteriormente, utilizando-se o método de Duval é preciso que se conheçam também as concentrações e a taxa de geração dos gases CO e CO₂.

Tabela 2.10 – Limite de Concentração e Geração Para o Método de Duval

Gás	Limites L1 (ppm)	Limites G2 (ppm/mês)
H ₂	100	50
CH ₄	75	38
CH ₂	3	3
C ₂ H ₂	75	38
C ₂ H ₆	75	38
CO	700	350
CO ₂	7000	3500

Sendo determinado que todos os requisitos do método são atendidos, é necessário calcular a contribuição percentual de cada gás (CH₄, C₂H₂ e C₂H₄), a qual está relacionada ao total desses três gases dissolvidos no óleo. Com estas porcentagens em mãos, plota-se no gráfico triangular mostrado na Figura 2.1 de forma a se obter a falta prevista pelo método.

Figura 2.1 – Triângulo de Duval para Diagnóstico de Falhas



- PD - DESCARGAS PARCIAIS
- T1 - FALHA TÉRMICA < 300° C
- T2 - FALHA TÉRMICA - 300° C - 700° C
- T3 - FALHA TÉRMICA > 700°C
- DT - FALHA ELÉTRICA E TÉRMICA
- D1 - DESCARGAS DE BAIXA ENERGIA
- D2 - DESCARGAS DE ALTA ENERGIA

Por ter fronteiras bem definidas entre as regiões de falha, há a possibilidade neste método de que as concentrações obtidas da cromatografia gasosa produzam um ponto em uma região de fronteira no triângulo de Duval gerando resultado dúbio.

CAPÍTULO 3

DETALHES DA FERRAMENTA DE PROGRAMAÇÃO

Neste capítulo será feita a apresentação do método utilizado para a criação da ferramenta proposta neste trabalho. Primeiramente, uma breve introdução e seleção do método na Seção 3.1, seguida por uma rápida explicação das principais características da linguagem na Seção 3.2.

3.1. Introdução

Para a criação de um sistema que necessita de execução de comandos do lado do servidor, como o aqui criado, precisa-se de uma linguagem de programação que atenda essa característica.

Uma linguagem de programação é uma ferramenta criada para indicar instruções para uma máquina, usualmente um computador. Estas linguagens podem ser usadas para criar programas que controlam o comportamento destas máquinas.

Estas linguagens podem ser compiladas ou interpretadas, dependendo da forma como elas interagem com o computador. Nas linguagens compiladas, mais rápidas, o código escrito é inteiramente traduzido para a linguagem de máquina para então ser executado, enquanto que as linguagens interpretadas vão tendo seus comandos traduzidos à medida que vão sendo executados, tornando-se mais lentas, porém mais flexíveis.

Por seu amplo uso, vasta documentação e baixo custo, a linguagem aqui utilizada será o PHP, sigla do inglês para o acrônimo recursivo PHP *Hypertext Preprocessor*, em tradução livre, PHP Pré-processador de Hiper-texto. Originalmente, PHP era sigla para *Personal Home Page*.

3.2. O que é o PHP

PHP é uma linguagem de programação de uso geral originalmente criada para desenvolvimento de páginas dinâmicas para a web. Para esta finalidade, o código PHP é inserido em um documento HTML e interpretado por um servidor web com um módulo de processamento PHP que gera uma página da web. O PHP pode ser utilizado na maioria dos servidores da web e em praticamente todas as plataformas livre de custos.

Qualquer código PHP em um arquivo é executado pelo *runtime* do PHP, normalmente para criar um conteúdo dinâmico para uma página web ou imagens dinâmicas usadas em *websites*.

O PHP primeiro age como um filtro, pegando a entrada vinda de um arquivo contendo texto e instruções PHP e fornece como saída um conjunto de dados, usualmente HTML.

Originalmente criado para desenvolvimento de *websites* dinâmicos, o PHP agora foca principalmente na programação do lado do servidor, o chamado *server-side scripting*, e é similar a outras linguagens do tipo *server-side* que fornecem conteúdos dinâmicos oriundos de um servidor web para o cliente como Microsoft Asp.net, Sun Microsystems's JavaServer Pages e mod_perl.

O PHP também tem atraído o desenvolvimento de inúmeros *frameworks* que fornecem blocos de construção e estrutura de *design* que promovem o desenvolvimento rápido de aplicações (RAD, do inglês *rapid application development*). Como exemplos têm-se o CakePHP, Symfony, CodeIgniter e Zend Framework oferecendo recursos similares a outros frameworks para a web.

A arquitetura LAMP se tornou popular na indústria da web como uma forma de implantar aplicações web. Normalmente o P é sigla para PHP enquanto que L, A e M referenciam Linux, Apache e MySQL respectivamente. O P também pode significar Python, Pearl ou alguma combinação entre eles. Também está disponível a configuração WAMP (Windows, Apache, MySQL e PHP) e MAMP (Mac OS X, Apache, MySQL e PHP) embora menos utilizadas em servidores web.

Em abril de 2007, mais de 20 milhões de domínios da internet tinham serviços web hospedados em servidores com PHP instalados. PHP é usado como linguagem de programação em 75% dos servidores da web. Sistemas de gestão de conteúdo escritos em PHP incluem MediaWiki, Joomla, eZ Publish, WordPress,

Drupal e Moodle. Todos os *sites* criados utilizando estas ferramentas são escritos em PHP, incluindo as partes de interface com usuário do Wikipedia, Facebook e Digg.

CAPÍTULO 4

USO DO PHP PARA IMPLEMENTAR OS MÉTODOS

Ao se iniciar a implementação há diversas abordagens que podem ser seguidas, dependendo-se da forma como se deseja que o programa final funcione. Neste trabalho optou-se por criar duas classes gerais do PHP, uma responsável por executar o método e outra com ferramentas auxiliares a serem utilizadas durante a execução do programa, de forma a tornar as rotinas mais simples. Uma classe é um conjunto de variáveis e funções trabalhando com essas variáveis.

Para o desenvolvimento da ferramenta de identificação das falhas, é necessária uma abordagem computacional para os métodos previstos na Seção 2.3, que será descrita na Seção 4.2 deste trabalho, após breve introdução na Seção 4.1. Na Seção 4.3, um conjunto de ferramentas auxiliares utilizadas é descrito.

Na Seção 4.4 deste capítulo será ainda apresentada uma API, Interface de Programação de Aplicativos, que será responsável por permitir a utilização da ferramenta aqui desenvolvida por *softwares* e *web sites* de terceiros.

Neste capítulo não será descrito o funcionamento de cada método, apenas uma exibição da abordagem computacional que foi dada a eles. O funcionamento detalhado de cada método está descrito na Seção 2.3.

4.1. Introdução

A execução do programa dá-se a partir da inserção dos dados de concentração pelo usuário, em ppm (partes por milhão) e se o método de Duval for utilizado, devem ser inseridas as taxas de geração de cada gás em ppm/mês (partes por milhão por mês). Esta inserção pode ser feita de duas formas diferentes. Na primeira, o usuário insere em um formulário os valores de concentração para sete gases diferentes, de apenas uma amostra, seleciona quais métodos quer aplicar naquela amostra e o programa gera um relatório. Outra forma é o envio de um arquivo em formato texto contendo uma grande quantidade de amostras. Neste caso o usuário

também deve selecionar quais métodos serão aplicados em todas as amostras antes do programa gerar o relatório.

Este arquivo de texto deve ser feito em um formato específico para que o programa consiga interpretar corretamente os valores das concentrações.

#	h2	ch4	c2h2	c2h4	c2h6	co	co2
21	350	480	20	500	76	730	7300
22	252	654	654	1321	654	4	465
23	321	65	68	65	654	153	123
24	465	654	654	15	123	52	231
25	4	54	12	21	54	54	21
26	12	54	654	321	321	546	45
27	87	54	45	97	4	54	12

A configuração do arquivo é simples. O relatório gerado pelo programa numera cada amostra. O símbolo na primeira linha e primeira coluna indica que o usuário está inserindo uma numeração própria e que ela deverá ser utilizada no relatório. Caso esta primeira coluna não exista, ou este símbolo não esteja presente, o programa irá numerar seqüencialmente as amostras no relatório.

A primeira linha a partir da segunda coluna é padrão, mas apesar disso a ordem das colunas pode ser alterada se o usuário julgar conveniente. Mas cada nome de gás deve ser sempre escrito da forma como o exemplo indica. A partir da segunda linha constam as concentrações dos gases em cada amostra.

Caso o método de Duval seja selecionado, existe ainda a necessidade da taxa de geração de cada gás para a execução do método. Estes valores devem ser adicionados nas colunas à direita do arquivo. Para tal, cada nome de gás existente da primeira linha deve ser copiado e acrescentado de uma letra “r” no final. Por exemplo, a taxa de geração do gás hidrogênio seria representada na primeira linha do arquivo por “h2r”.

Com os dados recebidos, o programa utiliza as classes principais e auxiliares para gerar o relatório, juntamente com um arquivo PDF que pode ser baixado, contendo este relatório.

4.2. Classe Principal de Execução dos Métodos

Dentro desta classe há quatro funções, cada uma responsável por executar cada um dos métodos previstos na Seção 2.3.

4.2.1. Método de Rogers

O método de Rogers utiliza quatro razões entre as concentrações dos gases. O primeiro passo é calcular estas quatro razões e compará-las com a Tabela 2.3, como segue.

01.	\$R1 = \$valuesC["CH4"]/\$valuesC["H2"];
02.	\$R2 = \$valuesC["C2H6"]/\$valuesC["CH4"];
03.	\$R3 = \$valuesC["C2H4"]/\$valuesC["C2H6"];
04.	\$R4 = \$valuesC["C2H2"]/\$valuesC["C2H4"];
05.	//Identificar o código gerado para cada razão
06.	//CH4/H2
07.	if (\$R1 < -0.1)
08.	\$codR1 = 5;
09.	elseif (\$R1 < 1)
10.	\$codR1 = 0;
11.	elseif (\$R1 < 3)
12.	\$codR1 = 1;
13.	else
14.	\$codR1 = 2;
15.	
16.	//C2H6/CH4
17.	if (\$R2 < 1)
18.	\$codR2 = 1;
19.	else
20.	\$codR2 = 0;
21.	
22.	//C2H4/C2H6
23.	if (\$R3 < 1)
24.	\$codR3 = 0;
25.	elseif (\$R3 < 3)
26.	\$codR3 = 1;
27.	else
28.	\$codR3 = 2;
29.	
30.	//C2H2/C2H4
31.	if (\$R4 < 0.5)
32.	\$codR4 = 0;

33.	elseif (\$R4 < 3)
34.	\$codR4 = 1;
35.	else
36.	\$codR4 = 2;

A variável \$valuesC contém os valores das concentrações inseridas pelo usuário, seja através do formulário, seja através do envio de um arquivo.

Para cada razão é armazenado um código na variável \$codRi onde i é o número da razão variando de 1 à 4.

Com os códigos individuais de cada razão gerados pelo trecho acima descrito, é criado um código de quatro algarismos, que é convertido utilizando a matriz abaixo que foi gerada analisando a Tabela 2.3, sendo criado um índice de 12 códigos seqüenciais, um para cada tipo de falha observado no método.

01.	\$matrix0[0][0][0][0] = 1;
02.	\$matrix0[5][0][0][0] = 2;
03.	\$matrix0[1][0][0][0] = 3;
04.	\$matrix0[2][0][0][0] = 3;
05.	\$matrix0[1][0][0][0] = 4;
06.	\$matrix0[2][0][0][0] = 4;
07.	\$matrix0[0][1][0][0] = 5;
08.	\$matrix0[0][0][1][0] = 6;
09.	\$matrix0[1][0][1][0] = 7;
10.	\$matrix0[1][0][2][0] = 8;
11.	\$matrix0[0][0][0][1] = 9;
12.	\$matrix0[0][0][1][1] = 10;
13.	\$matrix0[0][0][2][2] = 10;
14.	\$matrix0[0][0][2][2] = 11;
15.	\$matrix0[5][0][0][1] = 12;
16.	\$matrix0[5][0][0][2] = 12;

Com isso a função retorna o código da falha para o programa principal, que utiliza as ferramentas auxiliares descritas na Seção 4.3 para obter a descrição da falha prevista.

4.2.2. Método de Doernenburg

O funcionamento do método de Doernenburg, como descrito detalhadamente na Seção 2.3.2 é um pouco complexo.

Primeiramente as razões devem ser calculadas e uma delas deve exceder duas vezes um limite pré-definido pelo método e posteriormente, pelo menos um gás em cada razão deve exceder pelo menos uma vez este mesmo limite.

Na implementação computacional, optou-se por uma abordagem da seguinte forma:

01.	\$exceeded["h2"] = \$valuesC["H2"] / \$L1["h2"];
02.	\$exceeded["ch4"] = \$valuesC["CH4"] / \$L1["ch4"];
03.	\$exceeded["co"] = \$valuesC["CO"] / \$L1["co"];
04.	\$exceeded["c2h2"] = \$valuesC["C2H2"] / \$L1["c2h2"];
05.	\$exceeded["c2h4"] = \$valuesC["C2H4"] / \$L1["c2h4"];
06.	\$exceeded["c2h6"] = \$valuesC["C2H6"] / \$L1["c2h6"];

Ou seja, a variável \$exceeded armazena o quanto cada valor de concentração excede o limite L1 definido.

A partir daí, basta buscar se algum dos gases excede duas vezes o limite L1, tarefa realizada pela seguinte rotina.

01.	if (\$exceeded["h2"] >= 2) {
02.	if (\$exceeded["ch4"] >= 1 \$exceeded["c2h2"] >= 1 \$exceeded["c2h4"] >= 1) {
03.	\$useTheMethod = true;
04.	}
05.	} else {
06.	if (\$exceeded["ch4"] >= 2) {
07.	if (\$exceeded["h2"] >= 1 \$exceeded["c2h2"] >= 1 \$exceeded["c2h4"] >= 1) {
08.	\$useTheMethod = true;
09.	}
10.	} else {
11.	if (\$exceeded["c2h2"] >= 2) {
12.	if (\$exceeded["h2"] >= 1 \$exceeded["ch4"] >= 1 \$exceeded["c2h4"] >= 1) {
13.	\$useTheMethod = true;
14.	}
15.	} else {
16.	if (\$exceeded["c2h4"] >= 2) {
17.	if (\$exceeded["h2"] >= 1 \$exceeded["ch4"] >= 1 \$exceeded["c2h2"] >= 1) {
18.	\$useTheMethod = true;
19.	}
20.	}
21.	}

22.	}
23.	}

Sendo validada esta etapa, é verificado se pelo menos um gás em cada razão excede L1, da seguinte forma.

01.	if (\$exceeded["ch4"] <= 1 && \$exceeded["h2"] <= 1) {
02.	return 51;
03.	}
04.	if (\$exceeded["c2h2"] <= 1 && \$exceeded["ch4"] <= 1) {
05.	return 51;
06.	}
07.	if (\$exceeded["c2h2"] <= 1 && \$exceeded["c2h4"] <= 1) {
08.	return 51;
09.	}
10.	if (\$exceeded["c2h6"] <= 1 && \$exceeded["c2h2"] <= 1) {
11.	return 51;
12.	}

Se a continuidade do método for garantida, os valores das razões devem ser calculados e comparados com limites de acordo com a Tabela 2.7, comparação esta feita de forma simples, como segue.

01.	if (\$R1 > 1 && \$R2 < 0.75 && \$R3 < 0.3 && \$R4 > 0.4) {
02.	return 1;
03.	} else {
04.	//Partial Discharge
05.	if (\$R1 < 0.1 && \$R3 < 0.3 && \$R4 > 0.4) {
06.	return 2;
07.	} else {
08.	//Arcing
09.	if (\$R1 > 0.1 && \$R1 < 1 && \$R2 > 0.75 && \$R3 > 0.3 && \$R4 < 0.4) {
10.	return 3;
11.	} else {
12.	return 52;
13.	}
14.	}
15.	}

O retorno da rotina será o código de falha ou um código de falha, caso as concentrações dos gases não sejam suficientes para que o método seja aplicado. Este código será tratado pelo programa principal utilizando as ferramentas auxiliares para que se exibam os detalhes da falha.

4.2.3. Método IEC

O método IEC é bem semelhante ao método de Rogers, porém utiliza apenas três razões entre as concentrações dos gases, portanto, seu código de funcionamento é praticamente o mesmo. O único ponto em que o funcionamento difere é na estrutura de comparação dos limites de cada razão, limites estes que são distintos entre os dois métodos.

O retorno da classe será novamente o código da falha que será tratada no programa principal utilizando as ferramentas auxiliares para exibir para o usuário a descrição detalhada da falha.

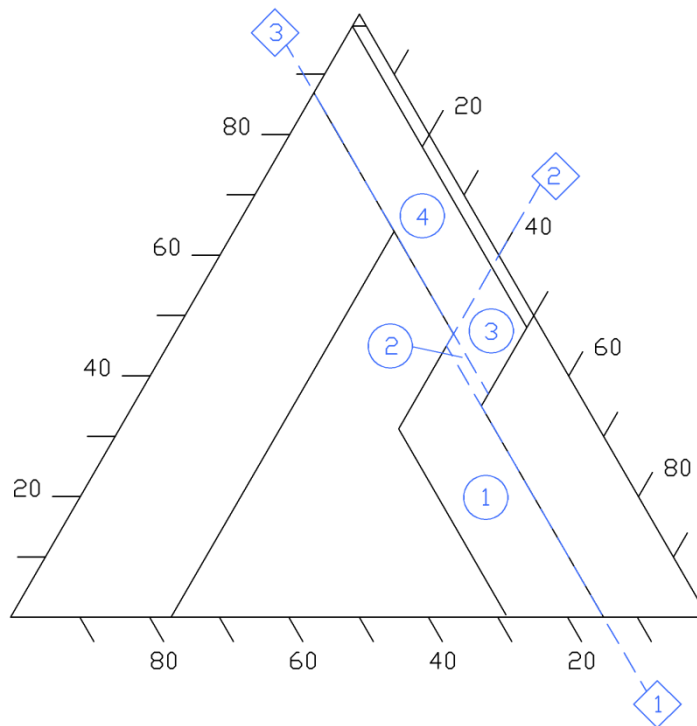
4.2.4. Método de Duval

O método de Duval é o de mais complexa implementação computacional dos quatro aqui utilizados. Os critérios para execução do método são descritos na Seção 2.3.4 e as formas de comparação são as mesmas já descritas nos outros itens desta seção, utilizados na implementação dos outros métodos.

Sendo satisfeitas todas as condições do método, é necessário plotar o ponto calculado através da porcentagem de cada um dos gases CH_4 , C_2H_2 e C_2H_4 no triângulo de Duval e observar na região de qual falha ele se encontra.

Para tal, utilizou-se retas auxiliares, de forma a se facilitar o posicionamento do ponto. Essas retas foram traçadas de forma que todas as regiões côncavas do triângulo fossem transformadas em regiões convexas, de modo que fosse possível a análise computacional através de regras condicionais “SE”, a função “if” para a ferramenta PHP aqui utilizada. A construção destas retas implementada como mostra a Figura 4.1. Utilizando-se três retas são geradas quatro regiões convexas que podem ser analisadas via software.

Observando-se as retas construídas, fica fácil notar que basta comparar-se os valores em cada lado do triângulo, com os pontos de cruzamento das retas nessas extremidades que se obtém a região da falha.

Figura 4.1 – Triângulo de Duval Mostrando Retas Auxiliares

O código abaixo implementa esta comparação de forma simples e rápida.

```

01. if ($p2 <= 23 && $p3 >= 13) {
02.     $response[] = 5;
03. }
04. if ($p2 >= 23 && $p3 >= 29 || $p2 >= 23 && $p2 <= 40 && $p3 >= 13 &&
    $p3 <= 29) {
05.     $response[] = 6;
06. }
07. if ($p2 >= 40 && $p2 <= 100 && $p3 >= 15 && $p3 <= 29 || $p2 >= 40 && $p2
    <= 50 && $p3 >= 2 && $p3 <= 15 || $p2 <= 40 && $p3 >= 2 && $p3 <= 13) {
08.     $response[] = 7;
09. }
10. if ($p2 >= 2 && $p2 <= 20 && $p3 <= 2) {
11.     $response[] = 2;
12. }
13. if ($p2 >= 20 && $p2 <= 50 && $p3 <= 2) {
14.     $response[] = 3;
15. }
16. if ($p2 >= 50 && $p3 <= 15) {
17.     $response[] = 4;
18. }
19. if ($p2 <= 2 && $p3 <= 2) {
20.     $response[] = 1;
21. }

```

Com isso tem-se a região em que o ponto se encontra, ou caso seja plotado em alguma fronteira, esta informação também será passada ao programa principal.

4.3. Classe Auxiliar de Ferramentas

Em conjunto com a classe responsável pela execução de cada método, há uma classe com ferramentas auxiliares, responsáveis por manipular os dados de entrada e saída de cada método junto ao programa principal. São basicamente quatro ferramentas.

A ferramenta dicionário é responsável por interpretar a resposta obtida em cada método. Com ela, utilizando-se o código de falta gerado por cada método é feita uma busca em um dicionário definido com a finalidade de se obter os detalhes da falha descrita.

Duas outras ferramentas são responsáveis por definir para o programa as concentrações de gases e suas respectivas taxas de geração, quando existirem, baseando-se nos dados de entrada do usuário, seja através do formulário, seja através do envio de arquivo. Ao mesmo tempo, verifica-se que os valores são válidos, ou seja, que todas as concentrações são informadas. Estes valores serão utilizados posteriormente por todos os métodos.

E, finalmente, a ferramenta responsável pelo envio do arquivo. Ela recebe o arquivo enviado pelo usuário, armazena este arquivo e faz sua leitura de forma que os valores informados pelo usuário possam ser utilizados pelo programa.

4.4. API

Após uma introdução explicitando o que é e quando deve ser utilizada uma API, o funcionamento do sistema aqui implementado é apresentado, mostrando a forma dos dados de entrada e saída e posteriormente um exemplo de aplicação.

4.4.1. Introdução

Uma API (sigla em inglês para Interface de Programação de Aplicativos) é um conjunto de regras e especificações que *softwares* podem seguir para comunicar-se entre si. É utilizada como uma interface entre diferentes *softwares* e facilita a interação entre eles, já que não é necessário conhecer-se o modo de funcionamento do programa ao qual se está utilizando, mas somente sua API.

Quando usado no contexto de desenvolvimento para a web, como a ferramenta aqui apresentada, uma API é um conjunto definido de mensagens de requisição em *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) juntamente com a definição da mensagem de resposta, usualmente no formato Extensible Markup Language (XML) ou Javascript Object Notation (JSON).

Para permitir que a ferramenta deste trabalho seja utilizada por terceiros em outros *softwares* ou páginas web, foi criado uma web API que será responsável por fornecer esta interação, desta forma os valores de concentração dos gases podem ser enviados e a falha obtida ser recebida, sem que se precise de um real acesso ao *site*.

4.4.2. Entrada de Dados

A API irá receber os dados, processá-los e devolver uma resposta no formato XML. A quantidade de dados recebidos pode variar, dependendo do método escolhido, mas deve sempre constar da concentração dos gases em partes por milhão e o código dos métodos a serem utilizados.

Caso o método de Duval seja selecionado, devem ser enviados também os valores da taxa de geração dos gases, em partes por milhão por mês.

A API está operando no endereço www.hendersonmele.com.br/TCC/API. O programador que deseja utilizá-la deve enviar através do método POST os valores de concentração dos gases juntamente com o código dos métodos que deseja utilizar. A Tabela 4.2 mostra quais variáveis devem ser enviadas e a Tabela 4.1 mostra o código utilizado para cada método. Os valores das concentrações e taxa de geração devem utilizar separador decimal do tipo ponto.

Tabela 4.1 – Códigos Definidos Para Cada Método

Código	Método
1	Rogers
2	IEC
3	Doernenburg
4	Duval

Tabela 4.2 – Lista de Variáveis a Serem Enviadas

Variável	Tipo	Unidade	Descrição	Exemplo
H2	FLOAT	ppm	Concentração de H ₂	350.7
CH4	FLOAT	ppm	Concentração de CH ₄	480.1
C2H2	FLOAT	ppm	Concentração de C ₂ H ₂	20.3
C2H4	FLOAT	ppm	Concentração de C ₂ H ₄	500
C2H6	FLOAT	ppm	Concentração de C ₂ H ₆	76.8
CO	FLOAT	ppm	Concentração de CO	730
CO2	FLOAT	ppm	Concentração de CO ₂	7300
H2R	FLOAT	ppm	Taxa de Geração de H ₂	270.6
CH4R	FLOAT	ppm	Taxa de Geração de CH ₄	253.9
C2H2R	FLOAT	ppm	Taxa de Geração de C ₂ H ₂	5.8
C2H4R	FLOAT	ppm	Taxa de Geração de C ₂ H ₄	39.2
C2H6R	FLOAT	ppm	Taxa de Geração de C ₂ H ₆	75.9
COR	FLOAT	ppm	Taxa de Geração de CO	524
CO2R	FLOAT	ppm	Taxa de Geração de CO ₂	3500
metodos	INT	-	Combinação dos métodos	14

4.4.3. Resposta da API

De posse dos dados enviados em conformidade com a Seção 4.4.2, a API retornará a falha estimada por cada método selecionado. Este retorno será no formato XML e conterá um código de falha, juntamente com a descrição da mesma. No método de Duval, a falha estimada pode não ficar bem definida, pois as concentrações podem levar a uma região de fronteira do triângulo de Duval. Para resolver este problema, uma *tag* XML *<tipo>* mostra-se a resposta do método informa somente uma falha, exibindo *<tipo>simples</tipo>* ou exibindo *<tipo>vários</tipo>* caso haja mais de uma falha para se exibir.

Veja na sequência o XML estruturado que representa a resposta de uma análise:

01.	<document>
02.	<analise>
03.	<codigo_metodo>1</codigo_metodo>
04.	<nome_metodo>roger ratio</nome_metodo>
05.	<tipo>unico</tipo>
06.	<codigo_falta>51</codigo_falta>
07.	<nome_falta>método de análise não aplicável</nome_falta>
08.	</analise>
09.	<analise>
10.	<codigo_metodo>4</codigo_metodo>
11.	<nome_metodo>triângulo de duval</nome_metodo>
12.	<tipo>varios</tipo>
13.	<falta>
14.	<codigo_falta>52</codigo_falta>
15.	<nome_falta>ponto na fronteira de definição das faltas:</nome_falta>
16.	</falta>
17.	<falta>
18.	<codigo_falta>7</codigo_falta>
19.	<nome_falta>composição de faltas térmica e elétrica</nome_falta>
20.	</falta>
21.	<falta>
22.	<codigo_falta>3</codigo_falta>
23.	<nome_falta>falta térmica de médio alcance 300°C - 700°C</nome_falta>
24.	</falta>
25.	<falta>
26.	<codigo_falta>4</codigo_falta>
27.	<nome_falta>falta térmica de alto alcance > 700 °C</nome_falta>
28.	</falta>
29.	</analise>
30.	</document>

Os dados enviados podem ser incompatíveis ou não estarem completos. Neste caso a API retornará uma resposta informando um código de erro, como descrito na Tabela 4.3, juntamente com a descrição deste erro. A resposta tem a seguinte estrutura.

01.	<document>
02.	<erro>
03.	<codigo>1</codigo>
04.	<descricao>Não preencheu concentrações</descricao>
05.	</erro>
06.	</document>

Tabela 4.3 – Códigos de Erro da API

Código	Descrição do Erro
1	Não preencheu todas as taxas de concentração
2	Não preencheu todas as taxas de geração
3	Não selecionou métodos ou código do método inexistente

4.4.4. Exemplo de Utilização

O desenvolvedor deverá implementar um código que será responsável por comunicar-se com a ferramenta. Com a finalidade de auxiliar programadores, foi criada uma função auxiliar que proporciona que um conjunto de dados de concentração seja analisado utilizando-se apenas poucas linhas de código.

A função *post_request* recebe como parâmetros somente o conjunto de concentrações, taxa de geração quando necessário e combinação dos códigos dos métodos a serem executados. A função tem o seguinte conteúdo:

01.	function post_request(\$data) {
02.	\$data = http_build_query(\$data);
03.	\$url = parse_url("http://www.hendersonmele.com.br/TCC/API/index.php");
04.	\$host = \$url['host'];
05.	\$path = \$url['path'];


```
06. $fp = fsockopen($host, 80, $errno, $errstr, 30);
07. if ($fp){
08.     fputs($fp, "POST $path HTTP/1.1\r\n");
09.     fputs($fp, "Host: $host\r\n");
10.     fputs($fp, "Content-type: application/x-www-form-urlencoded\r\n");
11.     fputs($fp, "Content-length: " . strlen($data) . "\r\n");
12.     fputs($fp, "Connection: close\r\n\r\n");
13.     fputs($fp, $data);
14.     $result = "";
15.     while($line = fgets($fp)) {
16.         $result .= $line;
17.     }
18. }
19. else {
20.     return array(
21.         'status' => 'err',
22.         'error' => "$errstr ($errno)"
23.     );
24. }
25. fclose($fp);
26.
27. $result = explode("\r\n\r\n", $result);
28. $header = isset($result[0]) ? $result[0] : "";
29. $body = isset($result[1]) ? $result[1] : "";
30. $path = explode("\n", $body, 2);
31. $content = trim(substr($path[1], 0, strlen($path[1]) - 1));
32.
33. return array(
34.     'status' => 'ok',
35.     'header' => $header,
36.     'content' => $content
37. );
38. }
```

Recebendo os dados corretamente, o retorno da função poderá ser de duas formas, dependendo se houve erro durante a execução da conexão ou não.

Caso haja erro durante a conexão com a API, a componente *status* retorna o valor “err”, juntamente com o código do nível de erro armazenado na componente *error*.

Caso a conexão ocorra corretamente, a componente *status* retorna o valor “ok” e outras duas componentes são retornadas, *header* e *content*. A primeira contém o cabeçalho da página retornada pelo API, portanto, fornecerá código 200 caso o processamento dos dados tenha sido bem sucedido ou, em caso de erro poderá retornar código 404 ou 500. Já a componente *content* conterá o conjunto XML gerado pela API, escrito na forma descrita no item 4.4.3 desta seção.

De posse desta resposta, é necessário analisar a resposta XML para que se exiba o resultado da análise apropriadamente. O PHP fornece um componente chamado DOMDocument que pode ser fácil e diretamente utilizado para ler esta resposta, basta informar para a função o valor da componente *content* gerado pela função anterior. O código seguinte mostra este procedimento, onde \$content é o valor da componente *content* gerado pela função anterior.

01.	\$dom = new DOMDocument;
02.	\$dom->loadXML(\$content);
03.	\$xml = simplexml_import_dom(\$dom);

Neste ponto, a variável \$xml é um objeto que tem a capacidade de acessar todos os campos da resposta XML de forma fácil e rápida, basta utilizar o item 4.4.3 desta seção como guia. Por exemplo, para que se saiba o código da falta gerada pelo primeiro método, basta que se utilize \$xml->analise->codigo_falta. Sendo assim o desenvolvedor pode desenvolver rapidamente uma página baseando-se nesta ferramenta, seja para a criação de uma nova interface, seja para agrupar diversas ferramentas em um mesmo local, os chamados *mashups*.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

O produto final deste trabalho é um *website* disponível 24 horas por dia, possibilitando a análise instantânea de transformadores baseado nos métodos aqui apresentados. Nesta seção serão exibidos alguns exemplos de análise gerados pela ferramenta, bem como imagens do *website*.

5.1. Telas do *Website*

A ferramenta disponível é de extrema simplicidade de utilização. Sendo assim, sua interface foi feita de forma que proporcionasse essa facilidade ao usuário. São exibidos apenas os campos de preenchimento exigido pelos métodos selecionados pelo usuário. Por exemplo, na Figura 5.1, os campos de taxa de geração (ppm/mês) não são exibidos, já que o método de Duval não foi selecionado, método que é o único a exigir este tipo de dados. Já na Figura 5.2, quando este método é selecionado, estes campos são mostrados.

Figura 5.1 – Interface Gráfica da Ferramenta Online

Análise de Transformadores

Concentração

	PPM
H ₂	<input type="text"/>
CH ₄	<input type="text"/>
C ₂ H ₂	<input type="text"/>
C ₂ H ₄	<input type="text"/>
C ₂ H ₆	<input type="text"/>
CO	<input type="text"/>
CO ₂	<input type="text"/>

Enviar Folha de Dados

Se você deseja enviar uma folha de dados ao invés de preencher o formulário, utilize esse campo.

Nenhum a...cionado

[Leia aqui como deve ser o formato do arquivo.](#)

☐ Método de Roger

☐ Método de Doernenburg

☐ Método IEC

☐ Método de Duval

Figura 5.2 – Interface Gráfica da Ferramenta Online

Análise de Transformadores

Concentração	Geração	Enviar Folha de Dados
<div>PPM</div> <div> <div>H₂</div> <div>CH₄</div> <div>C₂H₂</div> <div>C₂H₄</div> <div>C₂H₆</div> <div>CO</div> <div>CO₂</div> </div>	<div>PPM/mês</div> <div> <div>H₂</div> <div>CH₄</div> <div>C₂H₂</div> <div>C₂H₄</div> <div>C₂H₆</div> <div>CO</div> <div>CO₂</div> </div>	<div>Se você deseja enviar uma folha de dados ao invés de preencher o formulário, utilize esse campo.</div> <div> <div>Escolher arquivo</div> <div>Nenhum a...cionado</div> </div> <div> <div>Leia aqui como deve ser o formato do arquivo.</div> </div> <div> <div><input type="checkbox"/> Método de Roger</div> <div><input type="checkbox"/> Método de Doernenburg</div> <div><input type="checkbox"/> Método IEC</div> <div><input checked="" type="checkbox"/> Método de Duval</div> </div> <div> <div>Gerar Relatório</div> </div>

Desenvolvido por Henderson Rodrigues Mêlo como trabalho de conclusão de curso na Universidade de São Paulo.

5.2. Resultados de Análises

Para exemplificar, abaixo constam dois resultados gerados pela ferramenta. A princípio os dados são inseridos preenchendo-se o formulário manualmente com concentrações e taxas de geração, como indicados na Tabela 5.1. Somente com o método de Duval selecionado para ser realizado, a saída gerada pela ferramenta é como na Figura 5.3. Já na Tabela 5.3, é enviado um arquivo de texto com a folha de dados formatada como explicitado na Seção 4.1, contendo os dados indicados na Tabela 5.2 e selecionados os métodos de Roger, IEC e Doernenburg para análise.

Tabela 5.1 – Dados de Entrada Manual

Concentração	Geração
350	270
480	253
20	5
510	39
76	75
730	524
7300	3600

Figura 5.3 – Resultado da Análise Através de Inserção Manual

Resultados da Análise

Método Triângulo De Duval

Falta Térmica De Alto Alcance > 700 °C

Download do Relatório

[Faça aqui o download deste relatório em PDF.](#)

O arquivo ficará disponível por 24 horas.

Tabela 5.2 – Dados de Entrada por Folha de Dados

# Amostra	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	CO	CO2
1	31	21	1	13	27	220	2800
2	37	340	1	520	280	180	3100
3	37	42	1	12	110	410	4900
4	110	270	1	580	210	230	7400
5	6500	270	2200	340	34	260	470
6	13	47	1	18	150	130	4700
7	15	3	1	4	1	75	1100
8	77	3	1	6	4	130	4900
9	200	110	1	38	630	310	3800
10	17	17	1	87	25	110	4100
11	770	3100	21	4300	5100	270	2700
12	37	37	1	27	41	260	3100

Tabela 5.3 – Resultado da Análise Através de Envio de Folha de Dados

# Amostra	Roger	IEC	Doernenburg
1	Deterioração Normal	Envelhecimento Normal	Método De Análise Não Aplicável
2	Método De Análise Não Aplicável	Falta Térmica 300°C - 700°C	Decomposição Térmica
3	Superaquecimento 150°C - 200°C	Falta Térmica 150°C - 300°C	Método De Análise Não Aplicável
4	Método De Análise Não Aplicável	Falta Térmica 300°C - 700°C	Decomposição Térmica
5	Método De Análise Não Aplicável	Método De Análise Não Aplicável	Falta Não Identificável
6	Superaquecimento 150°C - 200°C	Falta Térmica 150°C - 300°C	Método De Análise Não Aplicável
7	Método De Análise Não Aplicável	Descarga De Alta Energia (arco Com Fluxo De Potência)	Método De Análise Não Aplicável
8	Superaquecimento Geral Do Condutor	Método De Análise Não Aplicável	Método De Análise Não Aplicável
9	Deterioração Normal	Envelhecimento Normal	Método De Análise Não Aplicável
10	Correntes Circulantes No Núcleo E Tanque, Juntas Superaquecidas	Falta Térmica > 700°C	Método De Análise Não Aplicável
11	Superaquecimento 150°C - 200°C	Falta Térmica 150°C - 300°C	Decomposição Térmica
12	Superaquecimento 150°C - 200°C	Falta Térmica 150°C - 300°C	Método De Análise Não Aplicável

Baseado neste retorno fornecido pela ferramenta fica claro a vantagem de se fazer a análise utilizando-se diversas ferramentas. Em algumas delas, nem todos os métodos são capazes de detectar falhas, porém outros a detectam.

Em amostras como a de número 11, há a confirmação pelos três métodos sobre o tipo da falha, o que dá uma maior confiabilidade. Nota-se que em nenhum momento os métodos dão análises contraditórias, assim como deve ser.

5.3. Plataforma *Mobile*

Com a crescente quantidade de equipamentos portáteis como *smartphones* e *tablets* no mundo, cada vez mais com acesso à internet, torna-se interessante disponibilizar-se a ferramenta aqui desenvolvida de forma a ser compatível com estes dispositivos. Senão assim, foi desenvolvida uma versão simplificada da ferramenta, que pode ser acessada através do endereço

www.hendersonmele.com.br/TCC/m, porém quando um usuário acessa o endereço padrão através de um dispositivo móvel, ele é automaticamente redirecionado para a versão apropriada do sistema.

Esta versão foi implementada utilizando a API, portanto ela mostra que terceiros tem acesso total à ferramenta e podem implementar diversas ferramentas utilizando-a. Veja na sequência imagens das telas desta versão em funcionamento.

Figura 5.4 – Plataforma *Mobile* – Tela Principal



Figura 5.5 – Plataforma *Mobile* – Resultados da Análise



CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A ferramenta desenvolvida foi capaz de fornecer a comparação desejada entre os diferentes métodos, de forma coerente, simples e rápida. Esta ferramenta permitirá uma estimativa instantânea das faltas eminentes de ocorrerem em um transformador em operação, baseado na análise cromatográfica de seu óleo para que se obtenha a previsão de deterioração no isolamento, podendo-se agendar manutenções preventivas no equipamento.

Além disso, a API desenvolvida permitirá que esta ferramenta seja acoplada a sistemas maiores e utilizada livremente, através de uma interface XML bastante explicativa.

Por ser uma ferramenta online, a página pode ser acessada de qualquer computador com acesso à internet, utilizando qualquer sistema operacional ou *browser* disponível no mercado, sendo mais simples do que o *download* e instalação de softwares. Paralelamente, a plataforma *mobile* é capaz de fornecer para qualquer usuário com um *smartphone* ou *tablet* com acesso à internet nas mãos a análise instantânea de uma amostra do óleo de um transformador.

Os resultados fornecidos foram satisfatórios e conforme esperados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/IEEE. **IEEE guide for protection of network transformers, C37.108-1989.** [S.l.]: [s.n.], 1989.

ANSI/IEEE. **IEEE guide for interpretation of gases generate in oil-immersed transformers, C57.104-2009.** [S.l.]: [s.n.], 2009.

FLAUZINO, R. A. **UMA ABORDAGEM FUZZY MULTICAMADAS APLICADA NA ESTIMAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE GASES EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.** Bauru: [s.n.], 2004.

HERMAN, H. et al. A new approach to condition assessment and lifetime prediction of paper and oil used as transformer insulation. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID DIELECTRICS, 7, 2001, Eindhoven. Proceedings of 7th International Conference on Solid Dielectrics, 2001.**

IMAMURA, M. M. **Uma abordagem neural para identificação de gases dissolvidos em óleo isolante de transformadores em função de parâmetros físico-químicos.** Bauru: [s.n.], 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.

ISLAM, S. M.; LEDWICH, G. Locating transformer faults through sensitivity analysis of high frequency modeling using transfer function approach. **Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, MONTREAL, 1996. 38 - 41.**

LI, J.-P. et al. Fault Diagnosis System of Transformer Based on GAS Chromatography. **Machine Learning and Cybernetics, 2006.**

MILASCH, M. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante.** [S.l.]: Editora Edgar Blucher Ltda, 1984.

MUHAMAD, N. A. et al. Comparative Study and Analysis of DGA Methods for Transformer Mineral Oil, 2006.

PETROBRAS. Portal BR, 2009. Disponível em: <<http://www.br.com.br/>>. Acesso em: 09 out. 2011.

SILVA, I. N. et al. Técnicas de sistemas inteligentes. **XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2001.**

WARD, S. A. Evaluating transformer condition using DGA oil analysis. **IEEE Conference Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003.**