

---

Predição de Falhas de Transformadores de  
Potência em Subestações Utilizando-se  
Máquinas de Estados Finitas

*Aarão Pedro Pires de Medeiros Junior*

---

# Predição de Falhas de Transformadores de Potência em Subestações Utilizando-se Máquinas de Estados Finitas

*Aarão Pedro Pires de Medeiros Junior*

**Orientadora:** *Profa. Dra. Luciana Cambraia Leite*

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**UFMS - Campo Grande**  
**Dezembro/2011**

# Predição de Falhas de Transformadores de Potência em Subestações Utilizando-se Máquinas de Estados Finitas

*Aarão Pedro Pires de Medeiros Junior*

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 09 de Dezembro de 2011 por:

---

Dra. Luciana Cambraia Leite  
DEL/UFMS - Orientadora

Banca examinadora:

---

Dr. Ivan Nunes da Silva  
Escola de Engenharia de São Carlos (USP/EESC)  
Departamento de Engenharia Elétrica (SEL)  
São Carlos SP

---

Dr. João Onofre P. Pinto  
Laboratório de Inteligência Artificial,  
Eletrônica de Potência e  
Eletrônica Industrial  
BATLAB - UFMS

# Agradecimentos

---

---

Agradeço:

A **Deus**, primeiramente, por ter me concedido força para concluir mais essa jornada.

A minha família, sempre me apoiaram para prosseguir nos estudos.

A **CAPES**, pelo apoio financeiro, pois sem ele não teria condições de iniciar o curso de mestrado.

A minha orientadora **Dra. Luciana Cambraia Leite** que me selecionou no processo seletivo dentre muitos outros alunos, e pelo caminho que me guiou nas pesquisas.

A banca examinadora, **Dr. Ivan Nunes da Silva** e **Dr. João Onofre P. Pinto**, que contribuíram para o refinamento deste trabalho.

A equipe do P&D, professores **Dr. Milton Ernesto Romero Romero**, **Dr. Evandro Mazina Martins**, **Dr. Ricardo Santos**, **Me. André Luiz Pasquali**, **Alexsandro Me. Carneiro**, pelas sugestões de pesquisas desse trabalho, e pela ajuda do desenvolvimento do mesmo.

A equipe de especialistas da ENERSUL, **Jacyr Muniz Silva Filho**, **Edson Miyamoto**, **Ana Paula Tsuyuguchi**, **Werneck Lebre Dias** pois contribuíram com grande parte das informações contidas nesse trabalho.

Aos colegas de mestrado, pela amizade que desenvolvemos durante o curso.

Sinto-me honrado por ter vivenciado parte de minha vida com todos os que eu citei nesse agradecimento.

Obrigado a todos...

*A Deus por sempre estar do meu lado  
A minha família por sempre ter me dado apoio.*

# Resumo

---

---

Este trabalho apresenta um modelo de máquinas de estados para o diagnóstico aplicado em transformador de potência da subestação. O sistema especialista tem por finalidade auxiliar na decisão dos operadores sobre a manutenção preditiva do transformador de potência a fim de prolongar sua vida remanescente. No diagnóstico são analisados três tipos de ensaios: cromatográfico - utilizando métodos convencionais de DGA (análise de gases dissolvidos), físico-químico e elétrico. Por meio desses ensaios, o sistema processa os valores medidos e apresenta o procedimento a ser realizado, isto é, dada uma determinada causa, define-se o estado do transformador e, para esse estado, é aconselhável seguir um determinado procedimento de manutenção especificado pelos especialistas. Como contribuição para o diagnóstico, essa dissertação apresenta toda a modelagem do sistema por máquinas de estado do tipo MEALY.

# Abstract

---

---

This paper presents a model of state machines for diagnosis to power transformer substation. The expert system is designed to assist operators in deciding about the predictive maintenance of the power transformer to prolong their remaining used to life. In diagnosis three types of tests are analyzed: chromatography - using conventional methods of DGA (dissolved gas analysis), physical-chemical and electrical. Through these tests, the system processes the measured values and presents the procedure to be performed, ie, given a specific case, it defines the state of the transformer and this state is advisable to follow a certain maintenance procedure specified by the experts. As a contribution to the diagnosis, this dissertation presents the entire system for modeling state machines of the MEALY type.

# Sumário

---

---

<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Comentários . . . . .	3
<b>2 Diagnóstico de Transformadores de Potência</b>	<b>4</b>
2.1 Ensaio Cromatográfico . . . . .	4
2.1.1 Método de Rogers (1978) . . . . .	4
2.1.2 Método da norma NBR7274 (1999) . . . . .	6
2.1.3 Método do Gás Chave (1991) . . . . .	6
2.1.4 Método de Triângulo de DUVAL . . . . .	7
2.2 Ensaio Físico-Químico . . . . .	9
2.2.1 Teor de Água e Rigidez Dielétrica . . . . .	10
2.2.2 Fator de Potência do Óleo Isolante . . . . .	10
2.2.3 Tensão Interfacial . . . . .	10
2.2.4 Índice de Neutralização . . . . .	10
2.3 Comentários . . . . .	11
<b>3 Definição dos Métodos para a Modelagem</b>	<b>12</b>
3.1 Pesquisas Estudadas para o Diagnóstico do TRAFO . . . . .	12
3.2 Sistemas Especialistas Aplicadas em Diagnóstico do TRAFO . . . . .	17
3.2.1 Máquina de Estado do Tipo MEALY . . . . .	18
3.3 Comentários . . . . .	19
<b>4 Sistema Especialista Utilizado na Modelagem dos Métodos Convencionais</b>	<b>20</b>
4.1 Modelo Geral para o Ensaio Cromatográfico . . . . .	20
4.2 Modelo para os Ensaios Físico-Químicos . . . . .	22
4.3 Comentários . . . . .	28
<b>5 Funcionamentos das Máquinas de Estados com os Dados Reais</b>	<b>29</b>
5.1 Comentários . . . . .	32
<b>6 Conclusões</b>	<b>33</b>
<b>A Sugestões de Máquinas de Estados para os Ensaios Elétricos</b>	<b>35</b>



<b>B Máquinas de Estado para os Métodos Convencionais de DGA</b>	<b>38</b>
<b>C Dados Utilizados para os Teste das Máquinas de Estados</b>	<b>45</b>
<b>Referências</b>	<b>52</b>

---

# Lista de Figuras

---

1.1	Fluxograma do funcionamento do sistema proposto . . . . .	3
2.1	Condições de falhas para o método do gás chave (1991) . . . . .	7
2.2	Triângulo de Duval (1989) . . . . .	9
3.1	Fluxograma da ferramenta proposta por (Almeida et al., 2005b) . . . . .	13
3.2	Fluxograma da ferramenta de (Morais e Rolim, 2004) . . . . .	14
3.3	Topologia do sistema proposto por Fontana et al. (2004) . . . . .	15
3.4	Arquitetura proposta por Ribeiro et al. (2009) . . . . .	15
3.5	Sistema de diagnóstico para ensaio cromatográfico e físico-químico utilizando RNA (Moreira et al., 2007) . . . . .	16
3.6	Visão geral dos conjuntos de estados . . . . .	18
3.7	Definição de máquina de estado do tipo MEALY . . . . .	19
4.1	Modelo geral para as máquinas do ensaio cromatográfico . . . . .	21
4.2	Estados das análises PCB e clorado . . . . .	23
4.3	Estados da análise do fator de potência . . . . .	24
4.4	Estados da análise da tensão interfacial . . . . .	24
4.5	Máquina de estado do Teor de Água, incluso teor de água e rigidez dielétrica . . . . .	25
4.6	Estados da análise do índice de neutralização . . . . .	26
4.7	Estados da análise do GP . . . . .	27
4.8	Estados da análise do 2-FAL . . . . .	27
4.9	Estados da análise do enxofre corrosivo . . . . .	28
A.1	Máquina de estado do Fator de Potência . . . . .	36
A.2	Máquina de estado da Resistência Ôhmica . . . . .	36
A.3	Máquina de estado da Relação de Transformação do Transformador (TTR) . . . . .	37
A.4	Máquina de estado da Resistência de Isolamento em CC . . . . .	37
B.1	Máquina de estado para o método do gás chave . . . . .	39
B.2	Legendas para a máquina de estado do método do gás chave . . . . .	39
B.3	Primeira parte da máquina de estado para o método de Rogers . . . . .	40
B.4	Segunda parte da máquina de estado para o método de Rogers . . . . .	41
B.5	Legendas para a máquina de estado do método de Rogers . . . . .	41
B.6	Primeira parte da máquina de estado do método NBR 7274 . . . . .	42
B.7	Segunda parte da máquina de estado do método NBR 7274 . . . . .	43
B.8	Legendas da máquina de estado do método NBR 7274 . . . . .	43
B.9	Máquina de estado do método triângulo de Duval . . . . .	44

B.10 Legendas da máquina de estado do método triângulo de Duval . . . . .	44
---	----

---

# Lista de Tabelas

---

---

2.1	Tabela de códigos do método (Rogers, 1978) . . . . .	5
2.2	Tabela de diagnóstico do método (Rogers, 1978) para o código da Tabela 2.1 . . . . .	5
2.3	Interpretação do método (NBR7274, 1999) . . . . .	6
5.1	Eventos possíveis para os estados Defeito Confirmado e Defeito Solucionado . . . . .	29
5.2	Ensaio cromatográfico . . . . .	30
5.3	Estados cromatográficos da máquina conforme os dados. Defeito confirmado (verdadeiro) e defeito solucionado (verdadeiro) . . . . .	30
5.4	Procedimentos de cada transição de estados da Tabela 5.3 . . . . .	30
5.5	Ensaio físico-químico . . . . .	31
5.6	Estados físico-químicos da máquina conforme os dados . . . . .	31
5.7	Estados físico-químicos da máquina conforme os dados . . . . .	31
5.8	Procedimentos físico-químicos dos estados da máquina conforme os dados . . . . .	31
5.9	Procedimentos físico-químicos dos estados da máquina conforme os dados . . . . .	32
C.1	Ensaio físico-químico . . . . .	46
C.2	Ensaio cromatográfico . . . . .	47

---

# Lista de Siglas

---

2-FAL - 2-Furfural;

H<sub>2</sub> - Hidrogênio;

CH<sub>4</sub> - Metano;

C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> - Acetileno;

C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> - Etileno;

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> - Etano;

CO - Monóxido de Carbono;

CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono;

DGA - Dissolved Gas Analysis (Análise dos Gases Dissolvidos no Óleo);

GP - Grau de Polimerização;

PCB - Bifenilas Policloradas;

PPM - Partes por Milhão;

TRAFO - Transformador de Potência;

TTR - Relação de Transformação do Transformador.

---

# Introdução

---

O transformador de potência (TRAFO) é um dos principais componentes de uma subestação de energia sendo de fundamental importância seu funcionamento contínuo, devido ao seu grau de responsabilidade. Em outras palavras, caso ocorra qualquer evento que impossibilite o funcionamento do TRAFO, poderia então causar danos e perdas produtivas em diversos setores com os quais exigem a qualidade no fornecimento de energia elétrica. Assim, o TRAFO deve ser monitorado de tal forma para até mesmo prever uma possível falha.

No decorrer do tempo, o TRAFO torna-se sujeito às falhas devido ao envelhecimento de seus componentes internos. É possível diminuir as falhas por meio da manutenção regular do próprio equipamento, sendo aconselhável o monitoramento em tempo real de suas condições atuais.

De modo geral, o TRAFO produz gás em seu interior, em certa medida, com temperatura normal de funcionamento. Mas, em determinados casos, a quantidade de gás gerado pode indicar: descarga parcial, superaquecimento, problema dielétrico, arco de baixa ou alta energia. Em equipamentos elétricos, estes indicativos são chamadas de "falhas"(Morais e Rolim, 2004). Os gases que são produzidos e medidos são: hidrogênio ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), etileno ( $C_2H_4$ ), etano ( $C_2H_6$ ), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

A análise dos gases dissolvidos no óleo (DGA) é uma série de métodos convencionais que auxiliam os especialistas para determinar o diagnóstico do TRAFO, dentre elas, os que serão estudados neste trabalho são: ROGERS, NBR7274, Triângulo de Duval e Gás Chave.

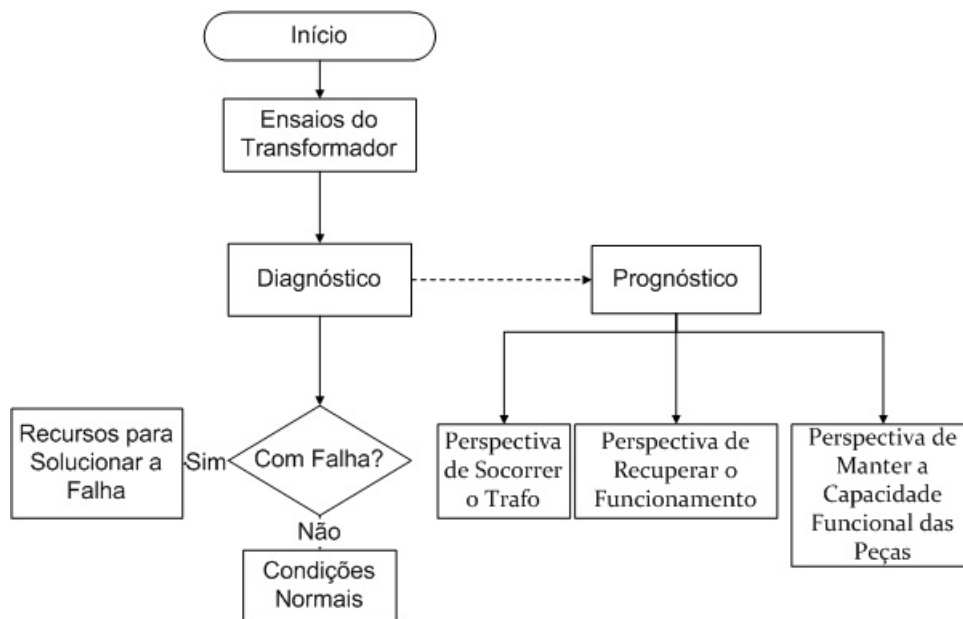
O diagnóstico e prognóstico são duas categorias para classificar o estado atual e o estado futuro do TRAFO, respectivamente. O termo "diagnóstico" se refere à determinação ou tomar conhecimento de quais são os estados ou a condição atual de um determinado elemento, por meio das análises de suas estruturas básicas. Em termos técnicos, "diagnóstico" do TRAFO

seria então, por exemplo, para o ensaio cromatográfico, analisar a taxa de produção de gases dissolvidos no óleo a fim de associar o gás presente a um tipo de falha; para o físico-químico, dada a análise do teor de água no óleo isolante do TRAFO, pode-se concluir que o nível de água no óleo está alto. Neste caso, a estrutura básica é apresentada mediante a quantidade de partes por milhões de água (PPM), sendo que, se essa quantidade de água exceder um limite específico em PPM, prevê-se o diagnóstico de "umidade excessiva no óleo isolante do TRAFO".

O "prognóstico" é o método de analisar o caminho futuro de uma determinada falha, ou seja, trata-se da previsão evolutiva do diagnóstico. Ainda em relação à análise do exemplo anterior, sobre o alto teor de água no óleo isolante, a conclusão para o prognóstico seria então: "com elevado teor de água no óleo isolante do transformador ocorreria o risco de emissão de bolhas reduzindo a capacidade de carga, e ainda, reduzindo a rigidez dielétrica da isolação, podendo produzir descargas parciais e então, realmente, ocorrer uma falha no TRAFO". Prognóstico pode ser orientado levando-se em consideração três fatores:

- Perspectiva de socorrer o transformador;
- Perspectiva de recuperar o funcionamento;
- Perspectiva de manter a capacidade funcional dos elementos ou peças.

Este trabalho tem como objetivos gerar um sistema de diagnóstico do TRAFO. Trata-se de um sistema de diagnóstico determinístico, baseado em máquinas de estados finitos, em que são considerados os ensaios cromatográficos (gases), físico-químicos (teor de água, rigidez dielétrica, fator de potência, tensão interfacial, 2-Furfural (2-FAL), grau de polimerização (GP), bifenilas policloradas (PCB) e Clorados) e elétrico (fator de potência, resistência ôhmica, relação de transformação do transformador (TTR), resistência de isolamento em CC). Para entender de forma geral a proposta dessa dissertação, analisa-se a Figura 1.1



**Figura 1.1:** Fluxograma do funcionamento do sistema proposto

Num primeiro momento, as entradas do fluxograma descrito na referida figura são os resultados de algum ensaio do TRAFO. Esses resultados serão analisados e emitidos um diagnóstico concluindo se está ou não com falha; se estiver com falha o sistema deve informar quais são os procedimentos para solucioná-la, caso contrário, o TRAFO está em suas condições normais de operação. Por meio do diagnóstico pode-se gerar o prognóstico podendo ou não conter os três fatores discutidos anteriormente.

## 1.1 Comentários

Com base no sistema proposto, ao armazenar os dados dos ensaios físico-químicos, cromatográfico e elétrico de forma consistente, é possível prognosticar o TRAFO ou utilizar quaisquer métodos baseados em sistemas inteligentes ou estatísticos a fim de associar os ensaios, como por exemplo, dado o ensaio físico-químico pode-se fazer um estudo sobre a quantidade de gases gerados para o ensaio cromatográfico.

Conforme visto na literatura, o prognóstico está em sua fase inicial de pesquisa, sendo de fundamental importância saber o percurso da falha (diagnóstico) ou a vida remanescente do TRAFO. Como por exemplo, dado que tenham dois TRAFOS que falham ao mesmo tempo, mediante ao relatório do prognóstico pode-se concluir qual dos TRAFOS necessitam de maiores cuidados, prevenindo a queda de energia do sistema caso a concessionária escolha o TRAFO errado para realizar os reparos.



---

# Diagnóstico de Transformadores de Potência

---

Neste capítulo serão abordados os trabalhos relevantes dentro do contexto de diagnóstico do transformador de potência para aprimorar os processos das concessionárias.

Para fins deste estudo somente serão considerados os diagnósticos para os ensaios cromatográficos e físico-químicos. Para os ensaios elétricos serão apresentadas apenas sugestões para trabalhos futuros (Apêndice A).

## 2.1 Ensaio Cromatográfico

O objetivo desse ensaio é verificar quais são as condições operativas do TRAF0. Dentre os métodos que estão em DGA, os que serão discutidos são: método de Rogers (1978), método da norma NBR 7274 (1999), método do gás chave (1991) e o método do triângulo de Duval (1989).

### 2.1.1 Método de Rogers (1978)

O método (Rogers, 1978) aplica o diagnóstico com o relacionamento entre os gases, limitando-os para cada tipo de falha. Possuem um total de quatro relações para cinco gases, nas quais são determinadas as condições do equipamento. O método é dividido em duas tabelas. A Tabela 2.1 estabelece os códigos em função das faixas de valores obtidos nas relações gasosas.

**Tabela 2.1:** Tabela de códigos do método (Rogers, 1978)

Relação de Gases	Faixa de Variação	Código
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	≤ 0,1	5
	> 0,1; < 1	0
	≥ 1; < 3	1
	≥ 3	2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>	< 1	0
	≥ 1	1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 1	0
	≥ 1; < 3	1
	≥ 3	2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	< 0,5	0
	≥ 0,5; < 3	1
	≥ 3	2

A Tabela 2.2 determina o diagnóstico final da amostra através da combinação destes códigos.

**Tabela 2.2:** Tabela de diagnóstico do método (Rogers, 1978) para o código da Tabela 2.1

CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> C <sub>6</sub> /HH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Diagnóstico
0	0	0	0	Condições normais
5	0	0	0	Descargas Parciais
1 / 2	0	0	0	Sobreaquecimento < 150°C
1 / 2	1	0	0	Sobreaquecimento 150°C – 200°C
0	1	0	0	Sobreaquecimento 200°C – 300°C
0	0	1	0	Sobreaquecimento de condutores
1	0	1	0	Correntes de circulação nos enrolamentos
1	0	2	0	Correntes de circulação no núcleo e tanque, sobreaquecimento em conexões
0	0	0	1	Descarga contínua
0	0	1 / 2	1 / 2	Arco com alta energia
0	0	2	2	Descarga contínua de baixa potência
5	0	0	1 / 2	Descarga parcial envolvendo o papel

Um exemplo prático, considerem-se que as relações dos gases CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> sejam iguais a 0,1; para esses dados o código da tabela 2.1 será 5-0-0-0, respectivamente. Ao consultá-lo na tabela 2.2 o TRAF0 possuirá o diagnóstico final de "Descargas Parciais".

### 2.1.2 Método da norma NBR7274 (1999)

O método NBR7274 (1999) é semelhante ao método de Rogers (1978), sendo que a diferença está na utilização de três relações para os cinco gases, com as quais se determinam as condições do transformador. A Tabela 2.3 apresenta o critério para a classificação da falha.

**Tabela 2.3:** Interpretação do método (NBR7274, 1999)

$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$	Diagnóstico
< 0,1	0,1 a 1,0	< 0,1	Condições normais
< 0,1	< 0,1	< 0,1	Descarga parcial de baixa energia
0,1 a 3,0	< 0,1	< 0,1	Descarga parcial de alta energia
> 0,1	0,1 a 1,0	> 1,0	Arco – descarga de baixa energia
0,1 a 3,0	0,1 a 1,0	> 3,0	Arco – descarga de alta energia
< 0,1	0,1 a 1,0	1,0 a 3,0	Sobreaquecimento < 150°C
< 0,1	> 1,0	< 0,1	Sobreaquecimento 150°C – 300°C
< 0,1	> 1,0	1,0 a 3,0	Sobreaquecimento 300°C – 700°C
< 0,1	> 1,0	> 3,0	Sobreaquecimento > 700°C

Considera-se que as relações dos gases sejam:

- $C_2H_2/C_2H_4$  igual a 0,5;
- $CH_4/H_2$  igual a 0,5;
- $C_2H_4/C_2H_6$  igual a 4.

Ao consultar na tabela 2.3 o diagnóstico do método será de "Arco - descarga de alta energia".

### 2.1.3 Método do Gás Chave (1991)

O método do gás chave (IEEE C.57.115, 1991) informa que, dado uma quantidade de gases gerados por meio do ensaio cromatográfico, alguns gases podem ser classificados como peculiares e um como dominante a uma falha específica.

Na Figura 2.1 consta a quantidade de gases gerados para cada falha. Neste trabalho adotou-se o seguinte critério: quando a quantidade do gás chave (gás em negrito) for maior que a porcentagem com margem de erro de 10%, então a falha é confirmada. Por exemplo, confirmada a presença de 20% do gás acetileno ( $C_2H_2$ ), então o estado do transformador está com falha de ARCO.

ARCO	CORONA	ÓLEO SUPERAQUECIDO
Relação em porcentagem dos gases:	Relação em porcentagem dos gases:	Relação em porcentagem dos gases:
CO: 0,01%	CO: 0,2%	CO: <0,01%
H <sub>2</sub> : 60%	<b>H<sub>2</sub>: 86%</b>	H <sub>2</sub> : 2%
CH <sub>4</sub> : 5%	CH <sub>4</sub> : 5%	CH <sub>4</sub> : 16%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 1,6%	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 1,6%	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 17%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 5,5%	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 0,2%	<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>: 63%</b>
<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>: 30%</b>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 0,1%	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 2%

CELULOSE SUPERAQUECIDA	ELETRÓLISE
Relação em porcentagem dos gases:	Relação em porcentagem dos gases:
<b>CO: 92%</b>	CO: <0,01%
H <sub>2</sub> : 6,7%	<b>H<sub>2</sub>: 99,9%</b>
CH <sub>4</sub> : 1,2%	CH <sub>4</sub> : <0,01%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : 0,01%	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> : <0,01%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : 0,01%	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : <0,01%
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 0,01%	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : <0,01%

**Figura 2.1:** Condições de falhas para o método do gás chave (1991)

### 2.1.4 Método de Triângulo de DUVAL

O triângulo de Duval (Duval, 1989) é um método que classifica as falhas do transformador dentro de subdivisões da área de um triângulo.

Antes de obter um diagnóstico do triângulo de Duval, verifica-se se o transformador possui falha; isso acontece porque no triângulo de Duval só existe classificação de falhas (Muhamad et al., 2007). Assim, avalia-se se a quantidade de gases existentes no recipiente de óleo do transformador está acima da referência. A referência utilizada pela concessionária pesquisada em estudo é dada por:

- Hidrogênio (H<sub>2</sub>) = 200 PPM;
- Metano (CH<sub>4</sub>) = 100 PPM;
- Monóxido de Carbono (CO) = 500 PPM;
- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) = 5000 PPM;
- Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) = 60 PPM;
- Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) = 100 PPM;
- Acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) = 15 PPM.

Para determinar se existe um problema, pelo menos um dos gases combustíveis deve ser maior ou igual à referência. Na máquina de estados do triângulo de Duval é adicionado o estado de "Referência Alta" seguindo esse critério.

No triângulo de Duval, apresentado na Figura 2.2, calcula-se o percentual relativo dos gases acetileno, etano e metano, em que cada lado do triângulo é referenciado pelo percentual dessas relações. Após o cálculo do percentual de cada gás, as coordenadas são traçadas de tal forma que as linhas sejam:

- Para o metano: paralela com o acetileno;
- Para o acetileno: paralela com o etileno;
- Para o etileno: paralela com o metano.

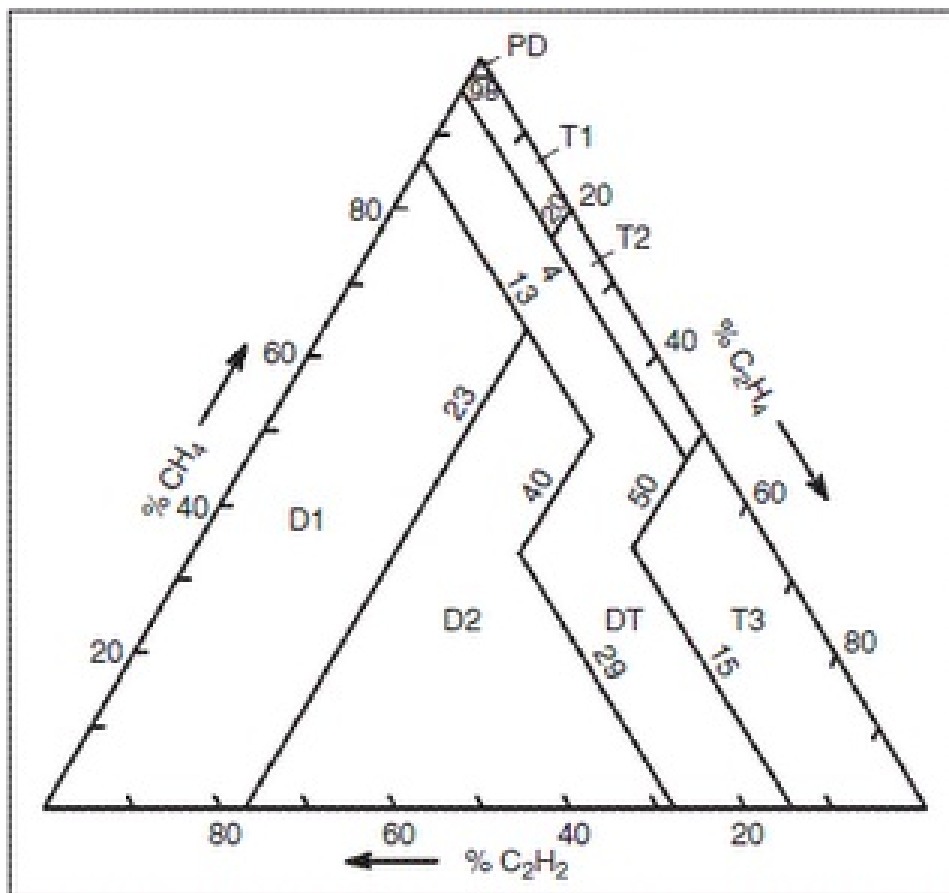
A fim de se definir a porcentagem dos gases e relacionar cada lado do triângulo, os cálculos necessários são apresentados abaixo.

$$\%C_2H_2 = \frac{100 * x}{x + y + z} \quad (2.1)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100 * y}{x + y + z} \quad (2.2)$$

$$\%CH_4 = \frac{100 * z}{x + y + z} \quad (2.3)$$

em que  $x =$  Acetileno ( $C_2H_2$ ),  $y =$  Etileno ( $C_2H_4$ ) e  $z =$  Metano ( $CH_4$ ).



**Figura 2.2:** Triângulo de Duval (1989)

Cada área do triângulo representa uma condição de falha, conforme a descrição da legenda abaixo.

- PD: descargas parciais;
- T1: falha térmica ( $T < 300^{\circ}\text{C}$ );
- T2: falha térmica ( $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$ );
- T3: falha térmica ( $T > 700^{\circ}\text{C}$ );
- D1: descargas de baixa energia;
- D2: descargas de alta energia;
- DT: Indeterminado, pode ser falha elétrica ou falha térmica.

## 2.2 Ensaio Físico-Químico

Os ensaios físico-químicos servem para analisar as propriedades físicas e químicas do óleo isolante do TRAFÓ. Essas propriedades sofrem alterações devidamente porque o óleo isolante

encontra-se em um processo contínuo de oxidação, podendo ser acelerado com a presença de compostos gasosos e líquidos (Godinho, 2009), comprometendo o funcionamento do TRAFO. Por este motivo os ensaios físico-químicos do óleo isolante são realizados anualmente na concessionária estudada.

Para fins desse estudo, as análises consideradas são as seguintes: teor de água, rigidez dielétrica, fator de potência, tensão interfacial, índice de neutralização, grau de polimerização (GP), 2-furfural (2-FAL), teor de bifenilas policloradas (PCB), clorado e enxofre corrosivo.

### **2.2.1 Teor de Água e Rigidez Dielétrica**

Como previsto em norma (NBR5416, 1997), a presença de água no óleo do transformador de potência faz com que o papel isolante seja submetido a um processo de degradação contínuo.

A rigidez dielétrica informa a capacidade do óleo isolante em resistir à tensão elétrica, estando relacionada com a quantidade de água no óleo isolante, isto é, quanto maior o teor de água, menor a rigidez dielétrica. As impurezas no óleo isolante também podem diminuir a rigidez dielétrica.

### **2.2.2 Fator de Potência do Óleo Isolante**

O fator de potência indica as perdas dielétricas do óleo isolante e quanto menor o seu valor, mais próximo o sistema estará do ideal (sistema não degradado). Seu valor é influenciado pela presença de partículas de alta condutividade, ou seja, quanto maior for o número de partículas, maior será o fator de potência. Para determiná-lo, uma tensão de 60 Hz é aplicada no óleo isolante e então se calcula a tangente ou o seno do ângulo de fase entre a tensão e a corrente (Godinho, 2009).

O acompanhamento contínuo da variação do fator de potência determina a qualidade do sistema isolante em termos de envelhecimento do óleo (NBR12133, 1991).

### **2.2.3 Tensão Interfacial**

A determinação da tensão entre as interfaces óleo-água indica o quanto água e óleo isolante estão separados. O monitoramento contínuo dessa medida pode indicar a fase inicial da deterioração da isolação (Milasch, 1984).

### **2.2.4 Índice de Neutralização**

O índice de neutralização quantifica o nível de acidez do óleo isolante. Os ácidos são formados pelo processo de oxidação, sendo que altos teores ácidos contribuem negativamente para a vida útil do próprio sistema, pois qualquer que seja a presença desses compostos, os materiais do TRAFO, principalmente os metais, passarão por diversas reações químicas (Godinho, 2009).

## 2.3 Comentários

Existem vários outros métodos em DGA que poderiam ser incorporado neste trabalho, mas por meio do objetivo de solucionar o problema da concessionária pesquisada, foram mantidos os mesmos métodos que os especialistas já estão familiarizados.

Ao analisar o método de Rogers (1978) e da norma NBR7274 (1999), pode-se perceber que não existe a relação completa para todas as faixas de valores para determinar o diagnóstico em suas tabelas, podendo não concluindo o diagnóstico final, mas porém o triângulo de Duval sempre apresentará um diagnóstico como discutido anteriormente. No gás chave os especialistas da concessionária baseiam-se nas faixas de valores dos gases.



---

# Definição dos Métodos para a Modelagem

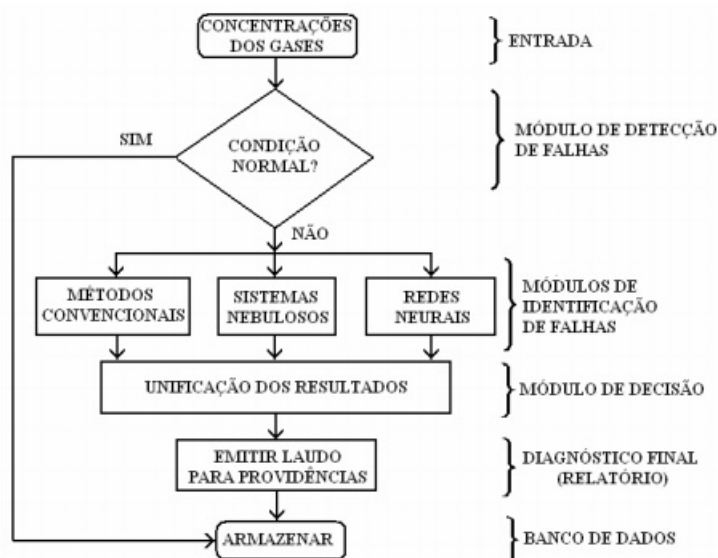
---

---

Neste capítulo será abordado qual foi o melhor método que se adequou para o diagnóstico do TRAFO na concessionária pesquisada, dentre todos aqueles foram estudados.

## 3.1 Pesquisas Estudadas para o Diagnóstico do TRAFO

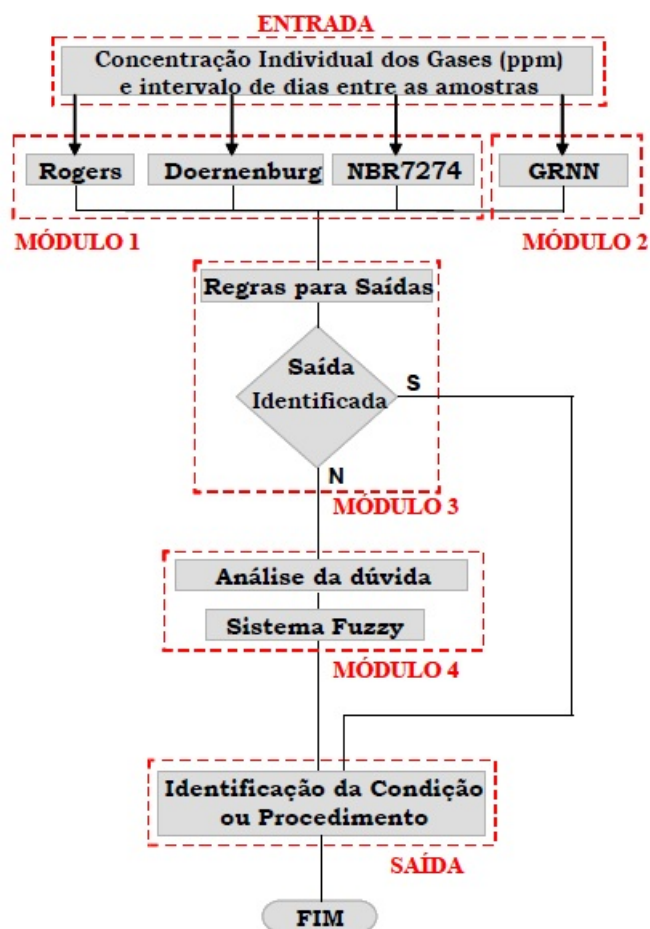
Almeida et al. (2005b) propuseram uma ferramenta de diagnóstico utilizando análise de gases dissolvidos no óleo (DGA). Dado um ensaio cromatográfico na entrada do sistema, um sistema fuzzy e duas redes neurais diferentes (Perceptrons de Multi-Camadas (MLP) e Funções de Base Radial (RBF)) calculam a saída. Em paralelo, os métodos convencionais, dentre os quais citam Dornenburg, Rogers, Duval, IEEE Std C57.104, IEC 599, NBR 7274, Gás Chave e Tsuchie, são também processados para o cálculo da saída. Então, verifica-se se há divergência entre as saídas (sistemas nebulosos, redes neurais e métodos convencionais); caso exista, o melhor diagnóstico do estado do TRAFO é verificado mediante de um sistema fuzzy que tem como base conceitos de nível do gás gerado - NGF e a taxa de geração dos gases - TGF, com auxílio do método Gás Chave. A Figura 3.1 mostra o fluxograma proposto.



**Figura 3.1:** Fluxograma da ferramenta proposta por (Almeida et al., 2005b)

Os métodos convencionais possuem saídas distintas, por exemplo, o método de Duval (1989) apresenta diferentes intervalos de temperatura quando comparado ao método de Rogers (1978). Conforme Spurgeon et al. (2005), um sistema fuzzy é modelado com três métodos: Rogers, Dornenburg e Gás chave. Nesse sistema, os autores definem as saídas dos métodos como hipóteses, e generaliza o conjunto como: falha térmica no papel, falha térmica, descarga parcial e arco. Os métodos IEC Standard, CEGB Standard, ASTM Standard são modelados em sistema fuzzy por Hooshmand e Banejad (2006).

Morais e Rolim (2004) criaram uma ferramenta utilizando conceitos de inteligência artificial para detectar as falhas de um TRAF0 com o auxílio de DGA. Desenvolveram um sistema utilizando os métodos convencionais (Rogers, Doernenburg e NBR7274) em conjunto com uma rede neural para subsidiar o diagnóstico do TRAF0, sendo decidido, finalmente, por um sistema fuzzy qual o tipo da falha do TRAF0 (falha térmica, falha elétrica ou condições normais). A Figura 3.2 detalha o funcionamento do sistema.



**Figura 3.2:** Fluxograma da ferramenta de (Morais e Rolim, 2004)

Como resultados obtidos, os autores afirmaram que os métodos convencionais não apresentaram boas taxas de diagnósticos corretos, mas a rede neural (GRNN) aplicada e a análise fuzzy apresentaram resultados razoáveis, conforme as conclusões dos autores.

O mesmo equivale ao exemplo anterior, pois uma das definições básicas para um sistema fuzzy é seguir a experiência do especialista da área.

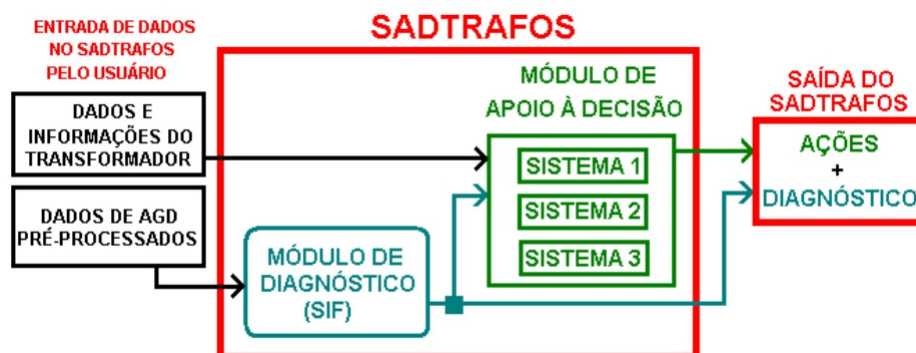
Para a avaliação dos métodos convencionais, Muhamad et al. (2007) propuseram estudos comparativos entre eles, os quais são: Gás Chave, Rogers, Doernenburg, Logarithmic Nomograph, IEC e Triângulo de Duval, analisando-se a precisão e consistência de cada um deles. Foram utilizados dados de transformadores com 92 casos diferentes. Concluiu-se que os métodos que utilizam códigos específicos (Rogers e IEC) para a interpretação são mais precisos para se fazer uma previsão. Todavia, se os dados não corresponderem com os códigos definidos no método, não serão capazes de fornecer sua previsão. Os demais métodos utilizam valores diretos para a interpretação do diagnóstico, gerando-se maior consistência e mesmo valor de precisão. Assim, os autores finalizam que como estes métodos têm todas as interpretações, o diagnóstico é susceptível de ser incorreto para determinados casos.

Fontana et al. (2004) adotaram as normas NBR5416 (1997) e NBR7274 (1981) para desenvolver um sistema especialista que calcule o máximo carregamento admissível do TRAFOS para um determinado risco decidido pelo operador. A Figura 3.3 mostra a topologia do sistema.



**Figura 3.3:** Topologia do sistema proposto por Fontana et al. (2004)

Em Ribeiro et al. (2009) fez-se um estudo de caso sobre a taxa de falha entre transformadores de diferentes idades e classes de tensão, concluindo que 68% das falhas envolvem enrolamentos, buchas e comutadores. O sistema proposto por eles, utiliza como base a análise DGA para identificação das falhas. O sistema é composto por um módulo de inferência fuzzy e um módulo de apoio a decisão, com os quais resultam no diagnóstico da falha e a recomendação para o gerente de manutenção. A Figura 3.4 apresenta a arquitetura do sistema.

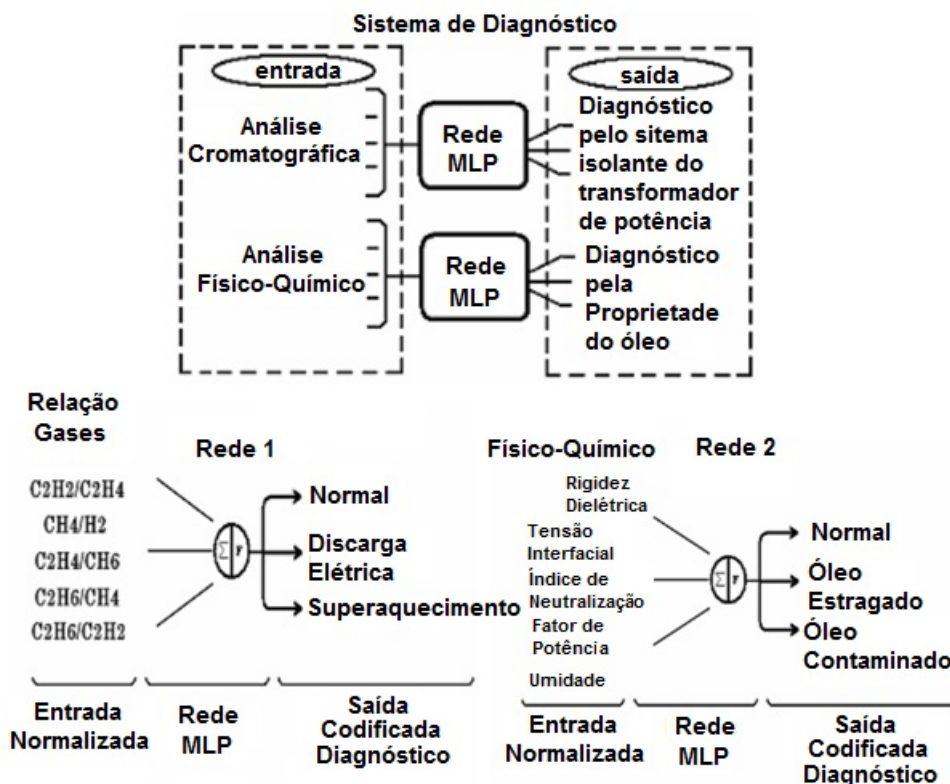


**Figura 3.4:** Arquitetura proposta por Ribeiro et al. (2009)

Dentre os sistemas com modelos de redes neurais artificiais que classificaram os padrões de DGA para o diagnóstico do TRAFO, tem-se o modelo de Meng et al. (2010), os quais utilizaram a rede RBF (Radial Basis Function) para classificar o estado do TRAFO em: condições normais, falha térmica, falha elétrica baixa ou falha elétrica alta. Jiajia et al. (2008) também empregaram o uso da rede neural RBF para categorizar o diagnóstico com o auxílio de DGA, no entanto, sua classificação para o estado do TRAFO foi a seguinte: descarga parcial (corona), falha elétrica baixa, falha elétrica alta, falha térmica ( $t < 300^{\circ}\text{C}$ ;  $300^{\circ}\text{C} < t < 700^{\circ}\text{C}$ ;  $t > 700^{\circ}\text{C}$ ).

Arantes (2005) utilizou uma rede MLP para associar o ensaio cromatográfico com os seguintes diagnósticos: falha não identificada, condições normais, falha térmica, descarga parcial e arco elétrico. Qi-Ping et al. (2009) também associaram os gases com quatro saídas da rede: condições normais, falha térmica, corona e arco.

Em Moreira et al. (2007) foi produzido dois tipos de diagnósticos, ambos classificados na rede neural Multilayer Perceptron (MLP), sendo que, uma RNA foi padronizada com análise cromatográfica e outra com análise físico-química. A análise físico-química tem por função, conforme os autores, diagnosticar as propriedades do óleo isolante. A saída da rede para a cromatografia está codificada em: condições normais, falha elétrica e falha térmica. Para o físico-químico: condições normais, óleo estragado e óleo contaminado. O modelo é representado pela Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Sistema de diagnóstico para ensaio cromatográfico e físico-químico utilizando RNA (Moreira et al., 2007)

Zhou et al. (2001) construíram uma RNA que relaciona o ensaio cromatográfico com a saída: descarga de alta temperatura, descarga de baixa temperatura, descarga interna, sobreaquecimento de alta temperatura, sobreaquecimento do núcleo, sobreaquecimento do tap switch, eletricidade estática do óleo, óleo submerso falha da bomba.

Em Chang et al. (2004) foi proposto um sistema neuro-fuzzy para realizar auto-aprendizado e auto-regra de ajustes, a fim de produzir as melhores regras para o diagnóstico.

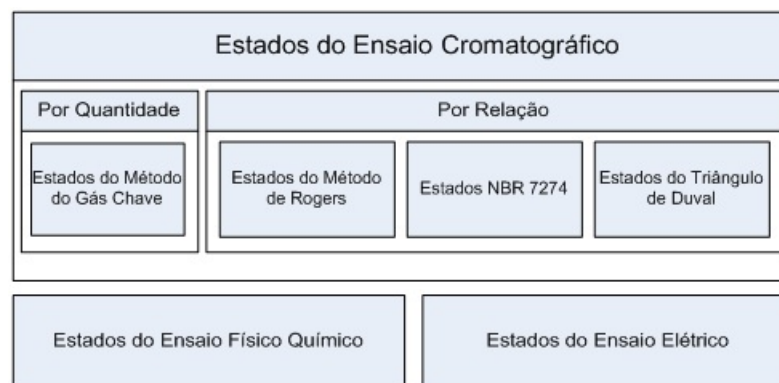
Sampaio et al. (2005) modelou um sistema de diagnóstico utilizando as redes de Petri Coloridas Hierárquicas para informar as causas dos acontecimentos na subestação de modo eficiente e eficaz, sendo que o diagnóstico aplicado possui como entrada em seu sistema as informações do SCADA.

Para propor uma RNA com o objetivo de auxiliar os outros métodos convencionais no diagnóstico é preciso, antes de qualquer ação a ser feita, ter dados para o treinamento. Neste trabalho foi observado que a concessionária possui os valores de gases em relação ao tempo de funcionamento, mas não possui de forma clara e bem definida o tipo da falha. Desta forma, tornou-se necessário reprocessar os valores dos gases em PPM nos métodos convencionais. Com isso, a rede aprenderia os resultados dos métodos, ou seja, a RNA não contribuiria para a melhoria do resultado.

Ainda que esses sistemas de diagnósticos identifiquem a falha do TRAFO com precisão, eles são dependentes da periodicidade do ensaio, em outras palavras, por quanto tempo o TRAFO ficou sujeito a essa falha? de Klerk et al. (2005) sugeriram um sistema de monitoramento on-line: captaram em seu estudo de caso, especificamente "Transformer C", um alto aumento do gás acetileno em apenas um dia, com variação de 5.60 ppm para 62.60 ppm, que poderia, então, passar despercebido até o próximo ensaio com periodicidade de 6 meses. Para este exemplo, o problema foi percebido e reparado rapidamente, evitando conseqüências catastróficas, afirmaram os autores.

## **3.2 Sistemas Especialistas Aplicadas em Diagnóstico do TRAFO**

A definição de diagnóstico para este trabalho pode ser resumida em: informações sobre os estados atuais do TRAFO, dadas às análises dos ensaios cromatográficos, físico-químicos e elétricos. A Figura 3.6 mostra os conjuntos de estados a serem modelados.



**Figura 3.6:** Visão geral dos conjuntos de estados

O método do gás chave é categorizado por quantidade porque implica em analisar os valores absolutos dos gases dissolvidos no óleo; os demais métodos relacionam a relação entre os gases presentes para apontar um diagnóstico.

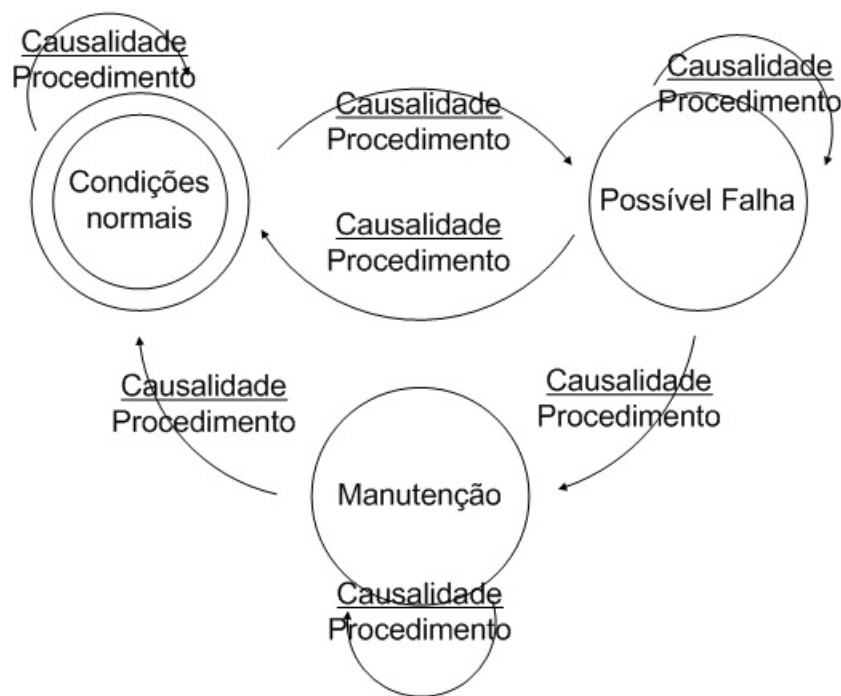
Utilizando-se as máquinas de estado do tipo MEALY gerou melhor compreensão dos vários ensaios realizados no TRAFO e suas relações de causalidades e, desta forma, podem ser utilizadas para determinar o grau de envelhecimento (Silva et al., 2000) determinando a temperatura interna (Freitas et al., 2002) em cada transição de estado. A ação recomendada ou procedimento quando existe uma falha no TRAFO foi definida pela concessionária pesquisada.

As modelagens a seguir podem ser utilizadas para qualquer concessionária, desde que sejam definidas suas causalidades e procedimentos.

### 3.2.1 Máquina de Estado do Tipo MEALY

A modelagem dos estados foi realizada dentro da teoria de máquinas de estados do tipo MEALY, pois gerou melhor compreensão dos vários ensaios realizados nos transformadores e suas relações de causalidade. As máquinas têm como objetivo seguir os procedimentos que a concessionária utiliza, ou seja, seguir a sua cultura.

A Figura 3.7 apresenta o procedimento simples dentro do conceito de máquinas de estados do tipo MEALY. O estado inicial do TRAFO está em "Condições normais", dada uma "Causalidade- diagnóstico - o estado TRAFO passa para "Possível Falha", tendo como saída do sistema o "Procedimento" a ser realizado.



**Figura 3.7:** Definição de máquina de estado do tipo MEALY

As nomenclaturas de cada estado e procedimento foram definidas pela equipe de especialistas da concessionária. Foram sugeridos, para todas as máquinas, modelos iniciais e ao decorrer da pesquisa os modelos foram sendo avaliados, aprimorados e aprovados pela equipe de especialistas. As máquinas de estados apresentadas nas próximas seções são as versões finais do sistema desenvolvido.

### 3.3 Comentários

Dentre todas as pesquisas adicionadas neste trabalho (seção 3.1), as metodologias foram precisamente estudadas, mas não se adaptavam as reais condições da concessionária pesquisada. Por conseguinte, foram analisados que precisaria associar a causalidade (os ensaios), o procedimento (manutenções) e o estado do TRAF0 (diagnóstico) antes de utilizar quaisquer métodos baseados em sistema inteligente ou estatísticos.

As máquinas de estados finitos serviram como base para qualquer outro tipo de emprego de outras tecnologias ou pesquisas científica, sendo de fundamental importância manter a consistência dos dados armazenados.



# Sistema Especialista Utilizado na Modelagem dos Métodos Convencionais

Esta seção apresenta como foi modelado o Sistema Especialista utilizando os métodos convencionais para o ensaio cromatográfico e o ensaio físico-químico e representado pelas máquinas de estado do tipo MEALY.

## 4.1 Modelo Geral para o Ensaio Cromatográfico

Para o ensaio cromatográfico são utilizados os métodos convencionais de Rogers, Triângulo de Duval, Gás Chave e NBR 7274. Todos utilizam o mesmo modelo definido na Figura 4.1, cuja diferença está no tipo de falha definida em cada método.

Para a análise da taxa de geração dos gases, a concessionária aplica a seguinte equação (Morais e Rolim, 2004):

$$TG = \frac{CA_t - CA_n * 30 * 100\%}{IT * CA_n} \quad (4.1)$$

em que,

$TG$  = Taxa de geração dos gases, relação do ensaio atual com o anterior;

$CA_t$  = Concentração atual (PPM);

$CA_n$  = Concentração anterior (PPM);

$IT$  = Intervalo de tempo.

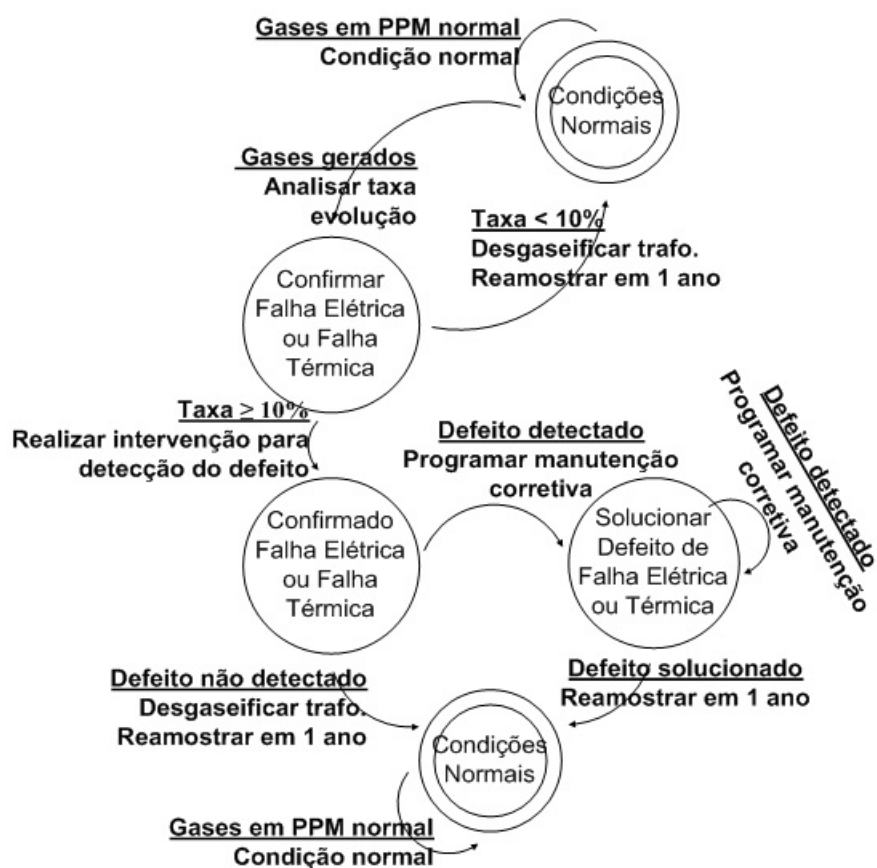


Figura 4.1: Modelo geral para as máquinas do ensaio cromatográfico

Inicialmente, considera-se que o TRAFO está no estado "Condições Normais". Se o ensaio cromatográfico indicar qualquer anomalia de gases gerados, definida pelos métodos convencionais, então o estado do TRAFO sofre uma transição para "Confirmar Falha Elétrica" ou "Confirmar Falha Térmica", conforme as indicações dos métodos. Para se confirmar falha, calcula-se a taxa de geração de cada gás presente: se for maior ou igual a 10% então "Confirmada Falha Elétrica" ou "Confirmada Falha Térmica"; caso contrário, o TRAFO está em "Condições Normais". Até esse momento a falha pode estar teoricamente comprovada, sendo aconselhável detectar o defeito do equipamento. Detectado o defeito, então se deve "Solucionar Defeito de Falha Elétrica" ou "Solucionar Defeito de Falha Térmica"; esse procedimento é útil quando se deseja, futuramente, confirmar o quão precisos são os métodos convencionais. Os autores (Zirbes et al., 2005) utilizam redes neurais para comprovar as incertezas nesses métodos. Quando o defeito for solucionado ou o defeito não for nem identificado o TRAFO está em "Condição Normais".

Todos os métodos convencionais foram modelados por máquinas de estado e são apresentados no Apêndice B desta dissertação.

## 4.2 Modelo para os Ensaiois Físico-Químicos

As análises consideradas são as seguintes: teor de água, rigidez dielétrica, fator de potência, tensão interfacial, índice de neutralização, grau de polimerização (GP), 2-furfural (2-FAL), teor de bifenilas policloradas (PCB), clorado e enxofre corrosivo.

Foi criado o estado de "confirmação de estado", o qual serve para prevenção de erros operativos de coleta do próprio óleo isolante. Neste estado o operador é obrigado a fazer outra coleta para confirmar o resultado; caso seja então confirmado, o TRAFO está realmente com contaminação ou envelhecimento do óleo isolante.

A Figura 4.2 apresenta as análises de PCB e clorado. Possuem dependência, ou seja, se há alto teor de PCB, necessariamente, haverá alto teor de clorado. As faixas de transições de estado "Contaminado por Askarel" é de PCB entre 50 mg/l e 500 mg/l e de Clorado menor que 50 PPM. No caso do estado "Contaminado por Askarel", o procedimento é "Recomenda substituir o óleo".

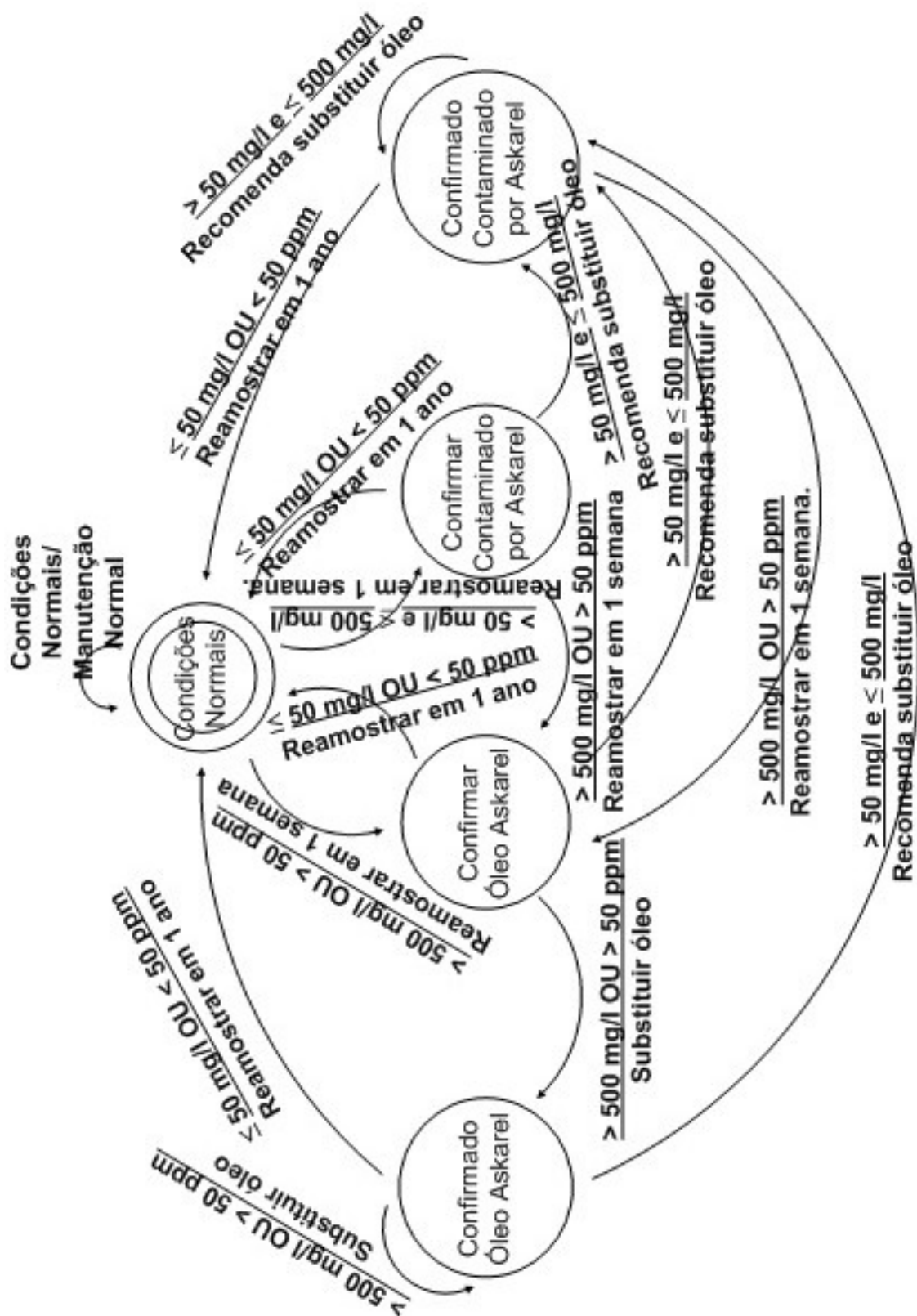


Figura 4.2: Estados das análises PCB e clorado

Para o estado de "Óleo Askarel" o PCB deve ser maior que 500 mg/l ou o clorado maior que 50 PPM, sendo que nesse caso é necessário "Substituir o Óleo".

A Figura 4.3 apresenta os estados para a análise do fator de potência: caso seja maior que 0,5%, o procedimento, depois de "Confirmado", é de "Circular o óleo para retirar impurezas".

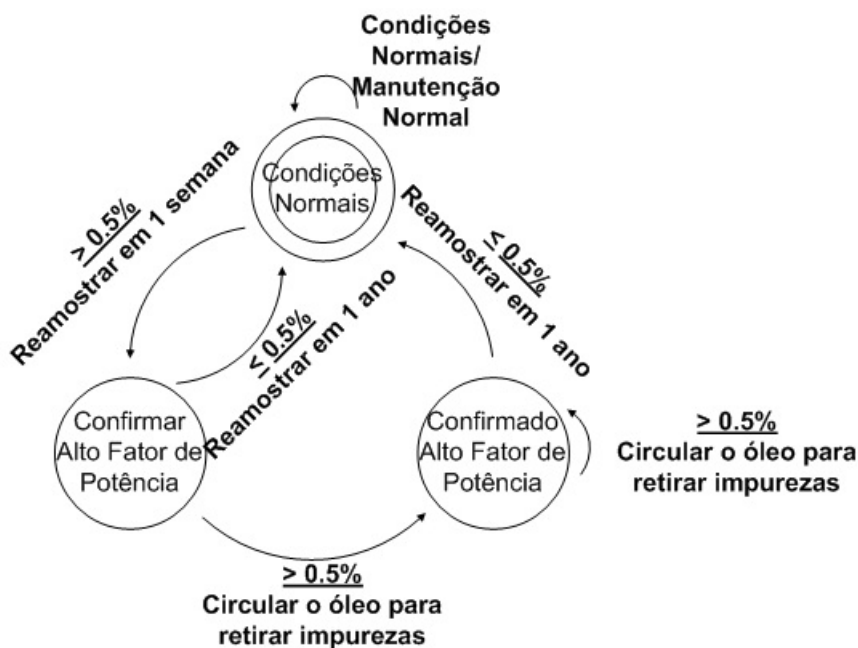


Figura 4.3: Estados da análise do fator de potência

Os estados para a análise da tensão interfacial estão representados na Figura 4.4. Se a tensão interfacial é maior que 23 dinas/cm, então o TRAFÓ está com "Alto Teor de Oxidação" e o procedimento deverá ser "Trocar o óleo".

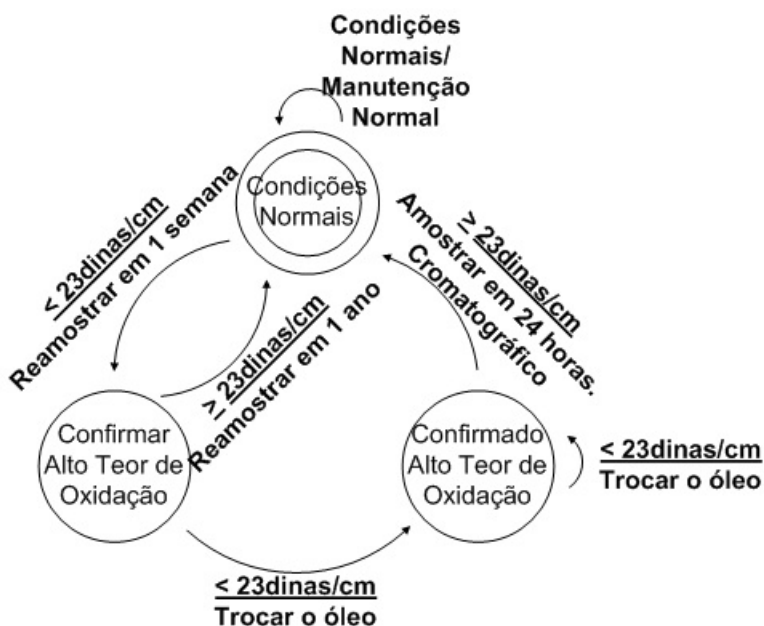


Figura 4.4: Estados da análise da tensão interfacial



Se o teor de água é maior que 50 PPM ou a rigidez dielétrica menor ou igual a 20 kV, então o óleo isolante está contaminado com "Altíssimo teor de água"; neste caso, o procedimento será de "Circular o óleo para retirada de umidade com secagem do núcleo".

Os estados para o índice de neutralização estão modelados na Figura 4.6. Quando o índice de neutralização é maior que 0,2 mg KOH/g indica que o estado do TRAF0 está com "alto teor de oxidação"; para essa causa o procedimento é "Trocar o óleo".

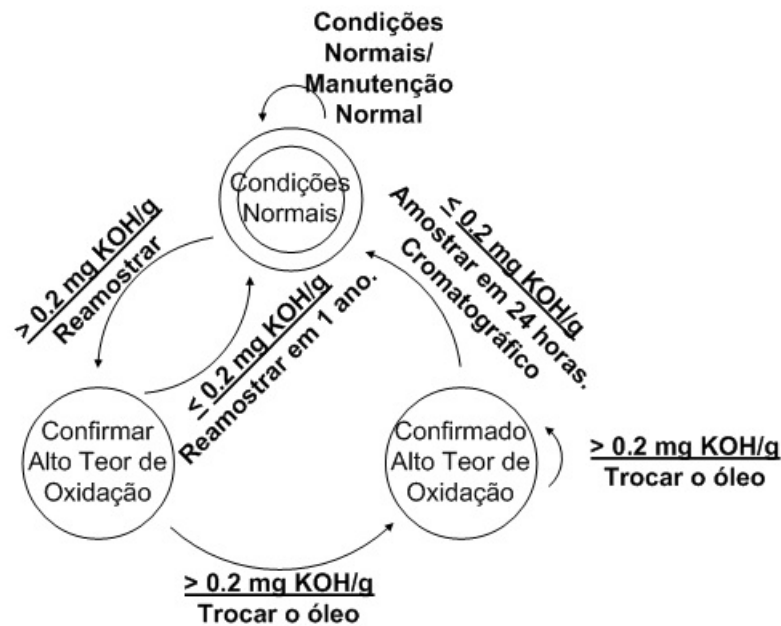


Figura 4.6: Estados da análise do índice de neutralização

Para o grau de polimerização (GP) foi eliminado o estado de confirmação de falha, justamente por ser uma análise sem possibilidades de erros operativos. Os estados dessa análise estão representados na Figura 4.7. Se o GP é menor ou igual a 250 monômeros, então o TRAF0 está com "Alta deterioração do papel", sendo que o procedimento é "Realizar acompanhamento com amostragem no 2-FAL".

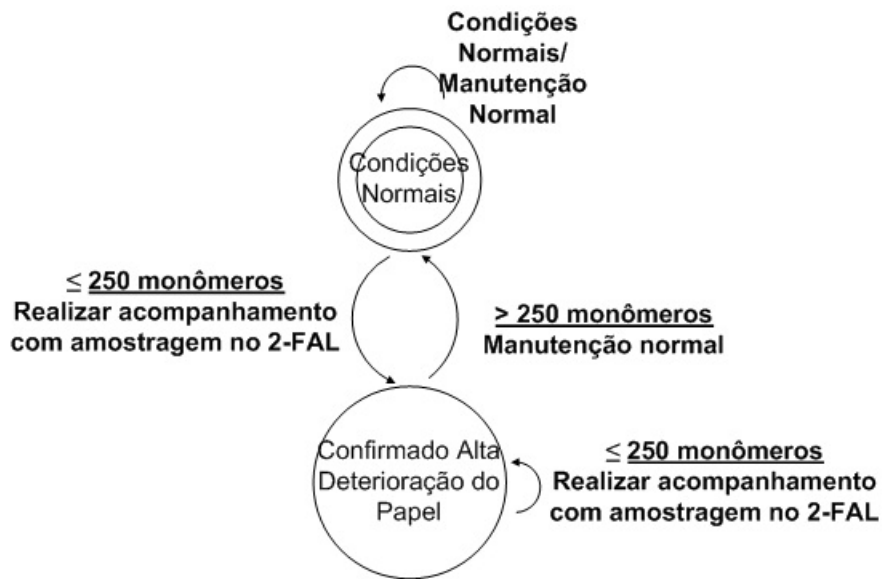


Figura 4.7: Estados da análise do GP

A Figura 4.8 mostra os estados da análise do 2-furfural (2-FAL). Quando o 2-FAL é maior ou igual que 1 PPM, depois de "Confirmado", o procedimento é "Realizar ensaio anualmente" para acompanhar a "Degradação anormal do papel", uma vez que, apontada a anormalidade, o TRAFO não voltará às condições normais; isso somente acontecerá se houver a troca do papel isolante no TRAFO.

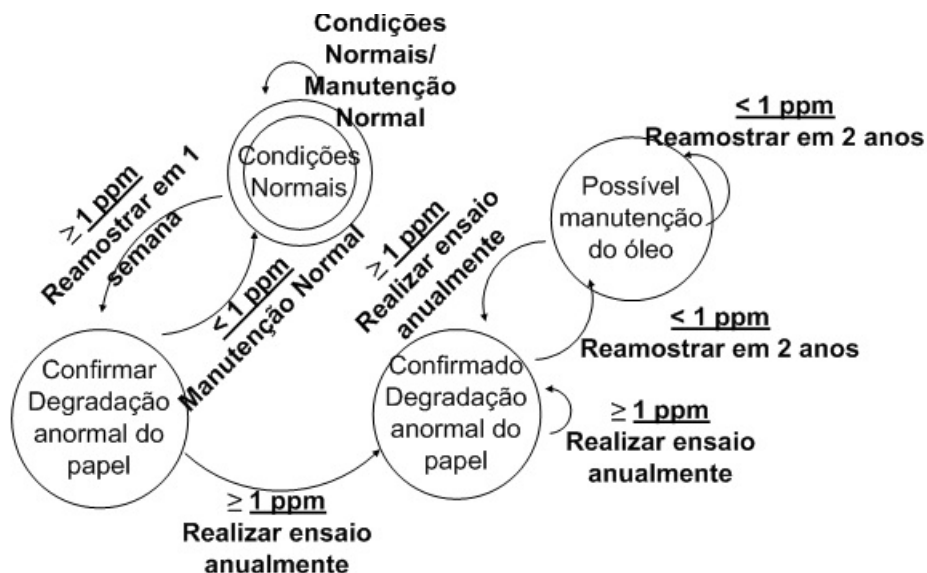


Figura 4.8: Estados da análise do 2-FAL

A máquina de estado para a análise do enxofre corrosivo está definida na Figura 4.9. Caso seja detectado enxofre corrosivo no óleo isolante, o procedimento é o de "Realizar passivação ou substituição do óleo".



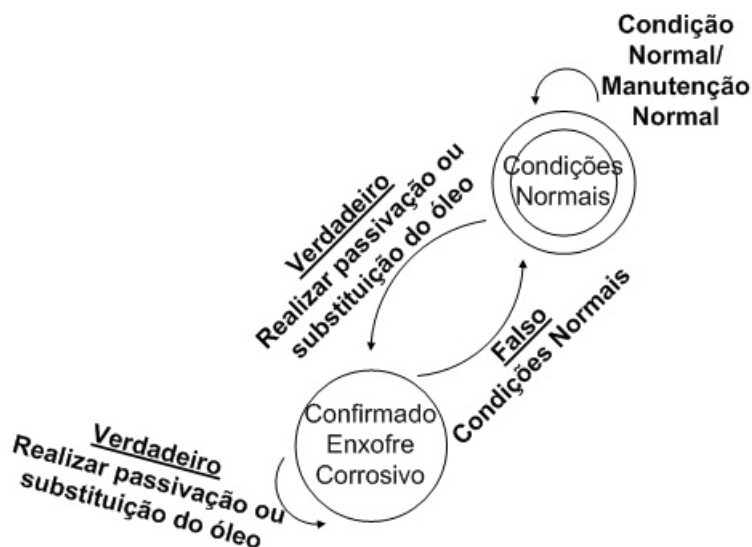


Figura 4.9: Estados da análise do enxofre corrosivo

### 4.3 Comentários

No ensaio cromatográfico, apesar de ter restringido o estudo dos métodos convencionais para este trabalho, por meio do modelo geral apresentado na seção 4.1 pode ser adaptado para quaisquer outros métodos previstos em DGA.

Nas máquinas do ensaio físico-químico, pode ser adicionado para cada transição de estado a degradação da vida útil do TRAF0, em destaque as máquinas do teor de água (Figura 4.5) e índice de neutralização (Figura 4.6), com as quais contribuem na degradação do papel isolante.

## Funcionamentos das Máquinas de Estados com os Dados Reais

Com os dados reais da concessionária disponíveis referente aos ensaios cromatográficos e físico-químicos, foi então possível realizar testes nos modelos definidos nas seções anteriores. Foram selecionados, aleatoriamente, cinco transformadores. Os demais ensaios estão no Apêndice C.

Existem dois estados nas máquinas de estados do ensaio cromatográfico que não são armazenados pela concessionária: "Defeito Confirmado" e "Defeito Solucionado", ambos precisam da entrada booleana (verdadeiro ou falso). Desta forma, para se realizar testes mais completos, foram geradas todas as três possibilidades (Tabela 5.1) para os mesmos dados, e então, analisou-se o comportamento da máquina.

**Tabela 5.1:** Eventos possíveis para os estados Defeito Confirmado e Defeito Solucionado

<b>Defeito Confirmado</b>	<b>Defeito Solucionado</b>
Verdadeiro	Verdadeiro
Verdadeiro	Falso
Falso	Irrelevante

Na Tabela 5.2 estão os cinco primeiros dados do ensaio cromatográfico de um transformador selecionado. Os resultados que compõem a variação do "Defeito Confirmado" e "Defeito Solucionado" são apresentados na Tabela 5.3 (estados das máquinas) e, na Tabela 5.4 estão os procedimentos da transição de estado.

**Tabela 5.2:** Ensaios cromatográficos

<b>Data</b>	<b>H<sub>2</sub> (PPM)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (PPM)</b>	<b>CO (PPM)</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (PPM)</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (PPM)</b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (PPM)</b>
22/12/97	152	36	778	128	10	137
29/12/97	76	48	788	130	13	129
21/12/98	0	0	85	11	3	0
09/08/99	41	7	1486	68	8	0
11/02/00	376	43	821	146	14	109

**Tabela 5.3:** Estados cromatográficos da máquina conforme os dados. Defeito confirmado (verdadeiro) e defeito solucionado (verdadeiro)

<b>Gás Chave</b>	<b>NBR7274</b>	<b>Rogers</b>	<b>Duval</b>
Condições Normais	Confirmar Falha Elétrica – Arco de alta energia	Confirmar Falha Elétrica – Arco de alta energia	Referência de gases alta
Condições Normais	Confirmado Falha Elétrica – Arco de alta energia	Confirmado Falha Elétrica – Arco de alta energia	Confirmar Falha Elétrica – Descarga Parcial Alta
Confirmar Celulose Superaquecida	Solucionar Defeito	Solucionar Defeito	Condições Normais
Confirmado Celulose Superaquecida	Condições Normais	Condições Normais	Referência de gases alta
Solucionar Defeito	Confirmar Falha Elétrica – Arco de alta energia	Confirmar Falha Elétrica – Arco de alta energia	Confirmar Falha Elétrica – Descarga Parcial Alta

**Tabela 5.4:** Procedimentos de cada transição de estados da Tabela 5.3

<b>Gás Chave</b>	<b>NBR7274</b>	<b>Rogers</b>	<b>Duval</b>
Manutenção Normal	Analisar taxa evolução	Analisar taxa evolução	Gases em PPM maior que a referência, amostrar no Duval
Manutenção Normal	Realizar intervenção para detecção do defeito	Realizar intervenção para detecção do defeito	Analisar taxa evolução
Analisar taxa evolução	Programar manutenção corretiva	Programar manutenção corretiva	Desgaseificar trafo. Reamostrar em 1 ano
Realizar intervenção para detecção do defeito	Reamostrar em 1 ano	Reamostrar em 1 ano	Gases em PPM maior que a referência, amostrar no Duval
Programar manutenção corretiva	Analisar taxa evolução	Analisar taxa evolução	Analisar taxa evolução

Com os dados disponíveis, a Tabela 5.5 apresenta os cinco primeiros ensaios registrados para o ensaio físico-químico.

**Tabela 5.5:** Ensaios físico-químicos

Data	Umidade (PPM)	Rigidez Dielétrica (KV)	Fator de Potência (%)	Tensão Interfacial (dinas/cm)	Índice de Neutralização (mg KOH/g)
25/11/97	38	88	0.259	30	0.03
28/06/98	18.7	69	0	32.7	0.029
18/02/99	49.5	37	0.057	28	0.02
11/03/99	20	60	0	31.4	0.02
12/03/99	20	60	0	31.4	0.02

Em conformidade com a Tabela 5.5, os estados para cada data são apresentados na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7.

**Tabela 5.6:** Estados físico-químicos da máquina conforme os dados

Data	Teor de Água	Fator de Potência
25/11/97	Confirmar alto teor de água	Condições Normais
28/06/98	Condições Normais	Condições Normais
18/02/99	Confirmar alto teor de água	Condições Normais
11/03/99	Condições Normais	Condições Normais
12/03/99	Condições Normais	Condições Normais

**Tabela 5.7:** Estados físico-químicos da máquina conforme os dados

Data	Tensão Interfacial	Índice de Neutralização
25/11/1997	Condições Normais	Condições Normais
28/06/1998	Condições Normais	Condições Normais
18/02/1999	Condições Normais	Condições Normais
11/03/1999	Condições Normais	Condições Normais
12/03/1999	Condições Normais	Condições Normais

Para cada estado gerado na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7, seus respectivos procedimentos estão representados na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9.

**Tabela 5.8:** Procedimentos físico-químicos dos estados da máquina conforme os dados

Data	Teor de Água	Fator de Potência
25/11/97	Reamostrar em 1 semana	Manutenção Normal
28/06/98	Reamostrar em 1 ano	Manutenção Normal
18/02/99	Reamostrar em 1 semana	Manutenção Normal
11/03/99	Reamostrar em 1 ano	Manutenção Normal
12/03/99	Manutenção Normal	Manutenção Normal

**Tabela 5.9:** Procedimentos físico-químicos dos estados da máquina conforme os dados

<b>Data</b>	<b>Tensão Interfacial</b>	<b>Índice de Neutralização</b>
25/11/1997	Manutenção Normal	Manutenção Normal
28/06/1998	Manutenção Normal	Manutenção Normal
18/02/1999	Manutenção Normal	Manutenção Normal
11/03/1999	Manutenção Normal	Manutenção Normal
12/03/1999	Manutenção Normal	Manutenção Normal

## 5.1 Comentários

Ao analisar os resultados das máquinas para os ensaios cromatográfico, logo na primeira linha da Tabela 5.3 houve a divergência de estado para a máquina do gás chave, apontando condições normais de operação do TRAFO, mas os demais métodos diagnosticaram falha. Deste modo, os especialistas da concessionária avaliarão os resultados distinguindo o parecer final, neste caso "Falha Elétrica". Sabe-se que existem na literatura (seção 3.1) métodos que distinguem o parecer final de forma automática, mesmo assim, foi mantido o diagnóstico final por meio do supervisor.

Ao testar as máquinas do ensaio físico-químico, pode-se perceber nas Tabelas 5.6 e 5.7 que na maioria dos casos o diagnóstico é "Condições Normais", para fins de emprego de métodos de sistemas inteligentes ou estatísticos necessitariam um maior número de TRAFO para que se possa ter um resultado consistente.

---

## Conclusões

---

A equipe de especialistas da concessionária concluiu que as máquinas de estados estão modeladas em conformidade com as regras, ou seja, o sistema contribuiu como um sistema especialista.

Foi possível testar (Apêndice C) as máquinas apenas para os ensaios cromatográfico e físico-químico. Os testes GP, 2FAL, PCB e Clorado foram deixados para o futuro. O ensaio de GP é de difícil execução, devido às complicações em tirar o transformador de funcionamento; mesmo assim, para esse tipo de situação as máquinas de estado foram projetadas, caso haja a necessidade de utilizá-la no futuro.

Os cinco (5) transformadores de potência selecionados para os possíveis testes demonstraram que a programação envolvida está de acordo com os modelos das máquinas de estado aprovados pelos especialistas, como apresentado no Capítulo 5.

As máquinas de estado poderão contribuir para melhorar a manutenção e os procedimentos, inclusive aqueles do ensaio cromatográfico, os quais possuem a estratégia de fazer com que o especialista armazene a informação de que o defeito foi confirmado. Assim, se for solucionado, armazena-se também o tipo de ocorrência. Isso contribui para futuras aplicações em RNA.

Os especialistas sugeriram que, ao apresentar os resultados da máquina, fosse disponibilizado um campo texto de conclusões para inserção manual, fazendo-se com que a apresentação seja de forma detalhada, como por exemplo, os quatro resultados da máquina do cromatográfico, descartando o uso de identificar apenas uma decisão.

Para executar o prognóstico foi sugerido fazer a estimativa da temperatura por meio da norma NBR5416 (1997), a fim de prever (estimar) a vida remanescente do transformador de potência.

Para trabalho futuro, mediante a norma NBR5416 (1997), pode-se calcular a porcentagem da perda de vida do transformador, podendo-se agregar às máquinas de estados considerando,

para cada transição, um percentual de perda de vida do papel, sendo oportuno o estudo de teores de água e índice de neutralização para a contribuição da degradação do papel isolante.

No Apêndice A contém a possível modelagem dos ensaios elétricos para os transformadores de potência, podendo ser continuados nos trabalhos posteriores.

---

## Sugestões de Máquinas de Estados para os Ensaios Elétricos

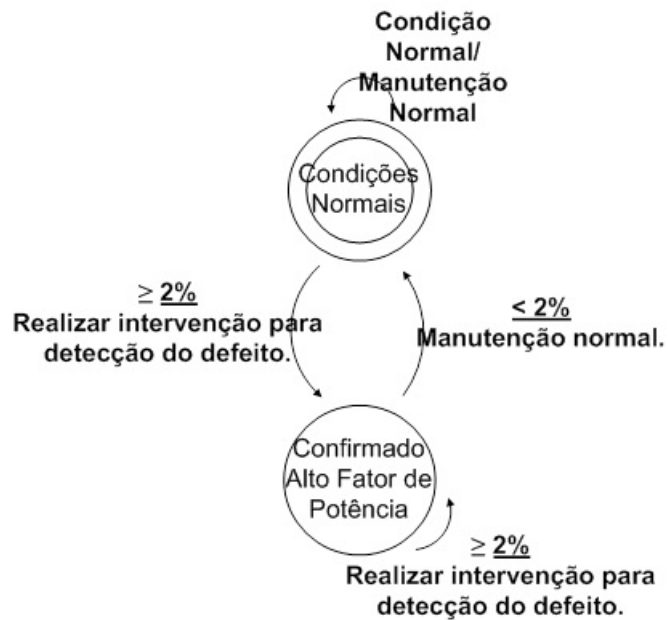
---

---

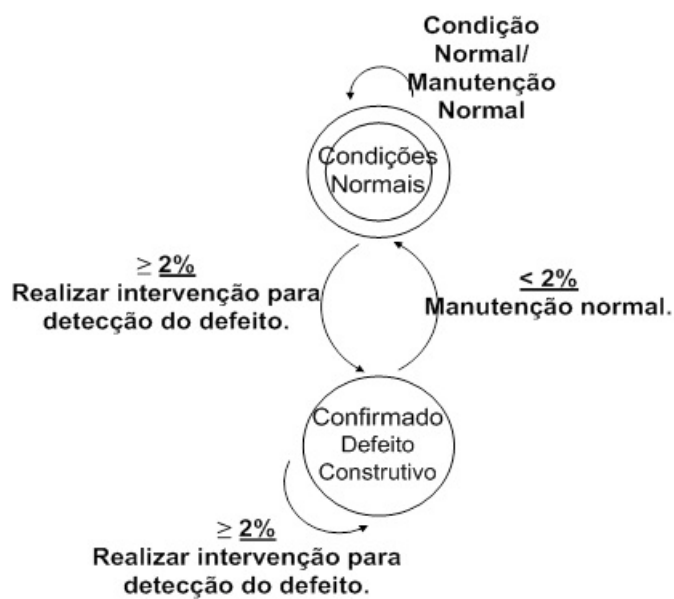
Esta seção apresenta sugestões de como diagnosticar para as mediadas: fator de potência, resistência ôhmica, relação de transformação do transformador, resistência de isolamento em CC. Os critérios de uso para cada uma dessas medidas devem ser bem especificados, todavia, podem ser generalizados como, por exemplo, o fator de potência (FP): tanto para o FP nos cabos quanto no FP das buchas podem utilizar a mesma máquina de estado.

As figuras a seguir apresentam as máquinas de estado para o ensaio elétrico.





**Figura A.1:** Máquina de estado do Fator de Potência



**Figura A.2:** Máquina de estado da Resistência Ôhmica

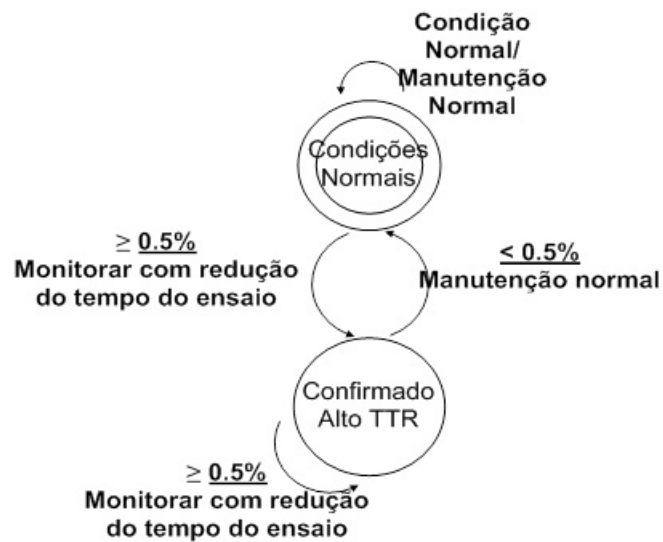


Figura A.3: Máquina de estado da Relação de Transformação do Transformador (TTR)

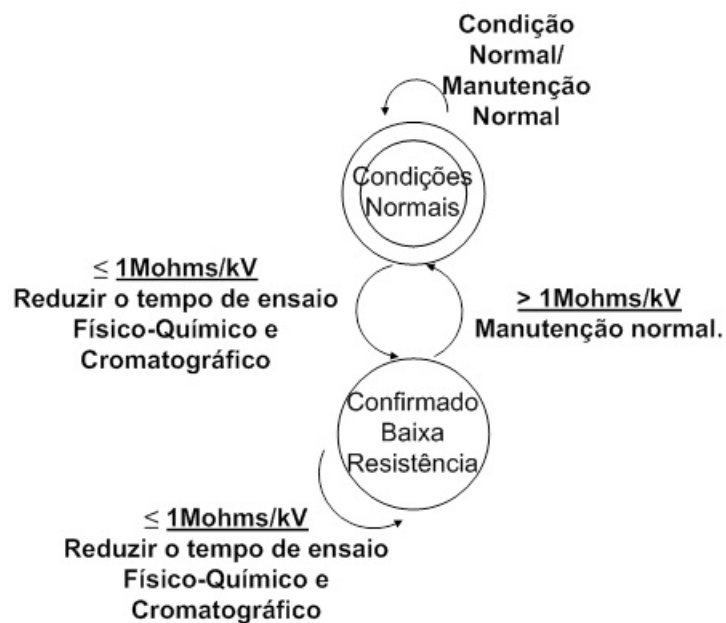


Figura A.4: Máquina de estado da Resistência de Isolamento em CC

---

## Máquinas de Estado para os Métodos Convencionais de DGA

---

---

Abaixo estão todos os modelos de máquinas de estados para o ensaio cromatográfico utilizados para diagnosticar o transformador de potência.

As máquinas modelas são:

- Máquina de estado para o método do gás chave;
- Máquina de estado para o método de Rogers;
- Máquina de estado do método NBR 7274;
- Máquina de estado do método triângulo de Duval;

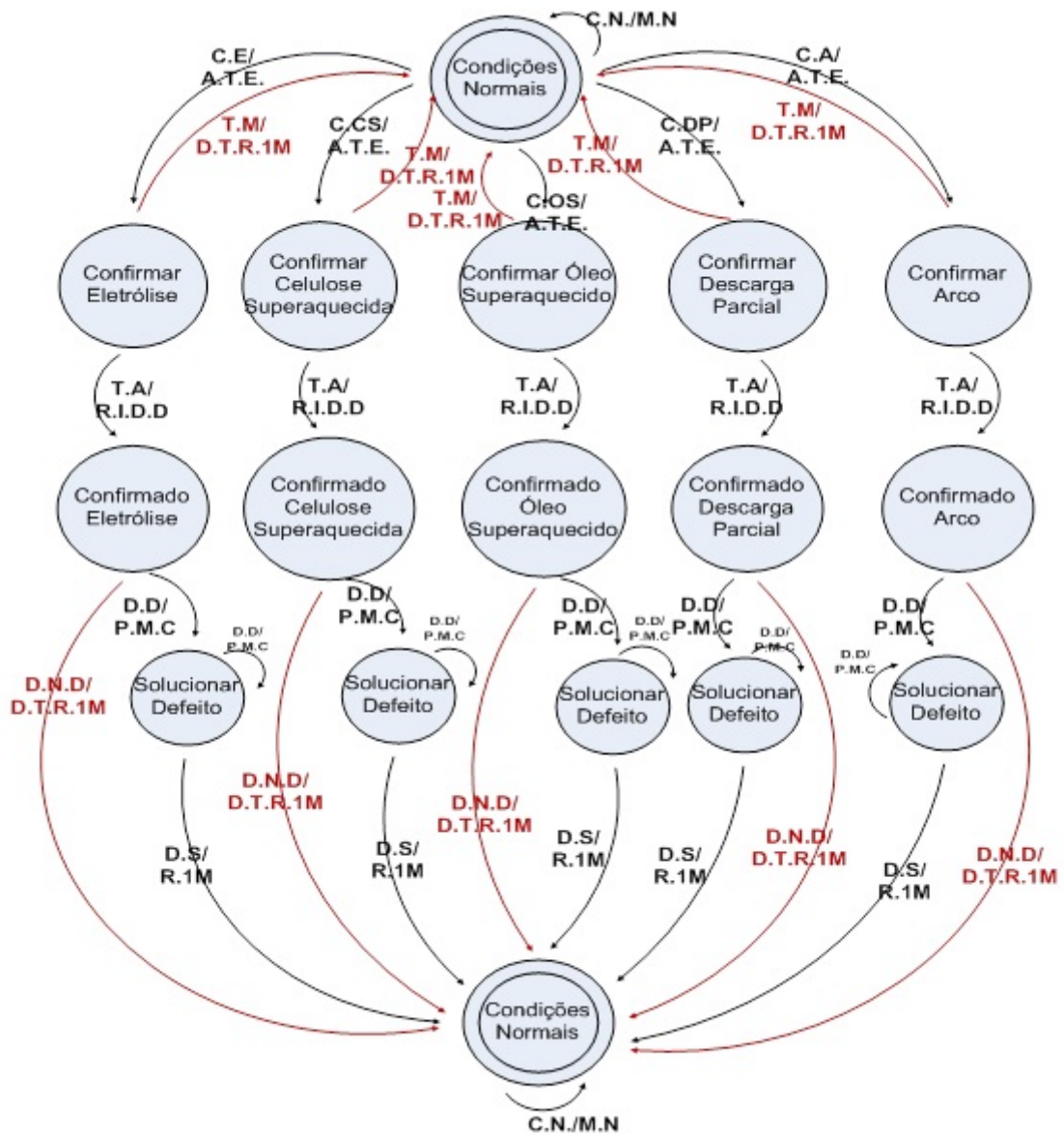


Figura B.1: Máquina de estado para o método do gás chave

CAUSAS	PROCEDIMENTOS
C.A. = Condição Arco	M.N = Manutenção Normal
C.DP = Condição Descarga Parcial (CORONA)	A.T.E. = Analisar a Taxa de Evolução
C.OS = Condição Óleo Superaquecido	R.1M = Reamostrar. 1 mês
C.CS = Condição Celulose Superaquecida	P.M.C = Programar Manutenção Corretiva
C.E = Condição Eletrolise	R.I.D.D = Realizar intervenção para detecção do defeito
C.N = Condição Normal	D.T.R.1M = Desgaseificar Trafo. Reamostrar. 1 mês
T.A. = Taxa de evolução > 10%	
T.M. = Taxa de evolução < 10%	
D.D = Defeito Detectado	
D.N.D = Defeito Não Detectado	
D.S = Defeito Solucionado	

Figura B.2: Legendas para a máquina de estado do método do gás chave

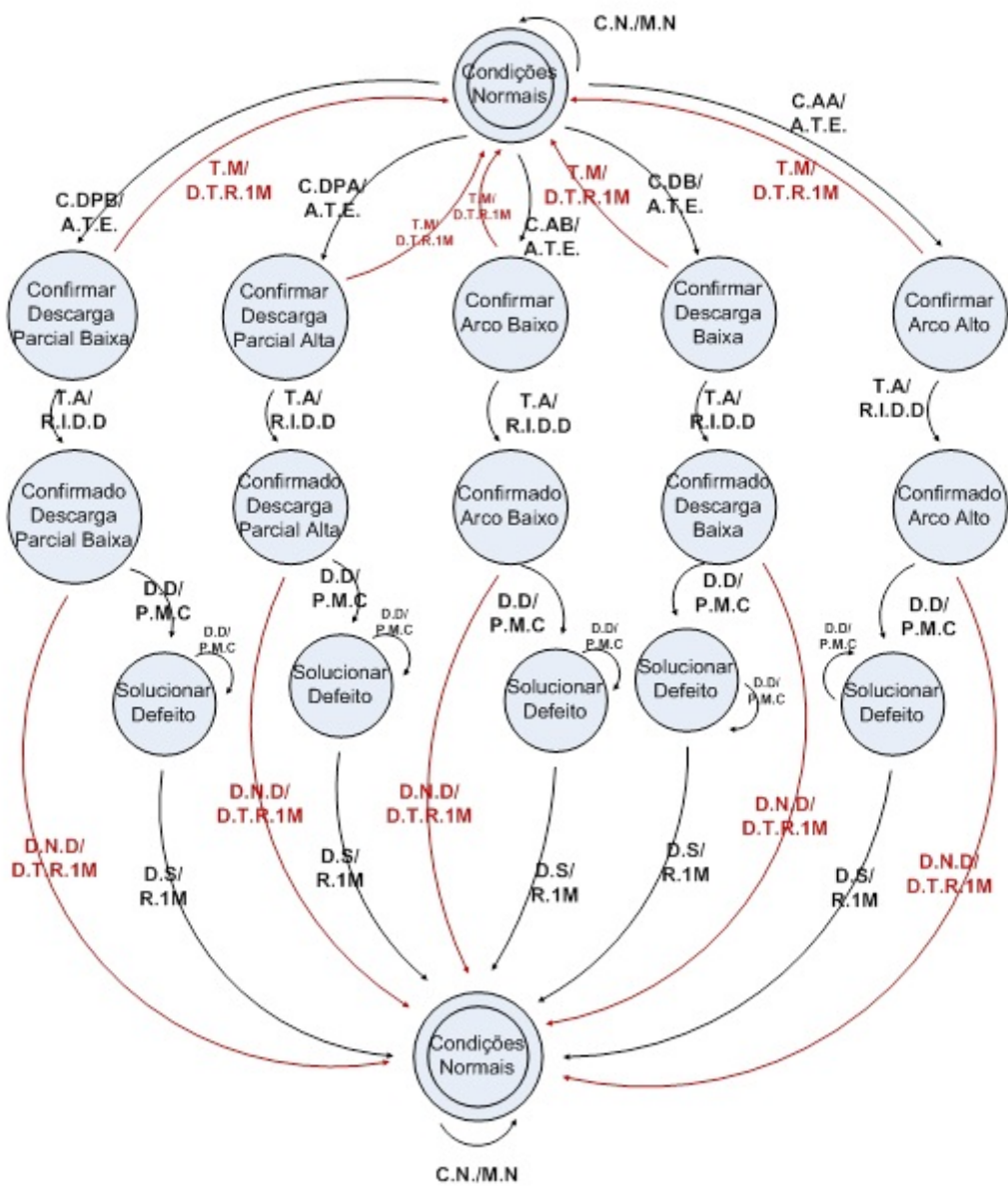


Figura B.3: Primeira parte da máquina de estado para o método de Rogers

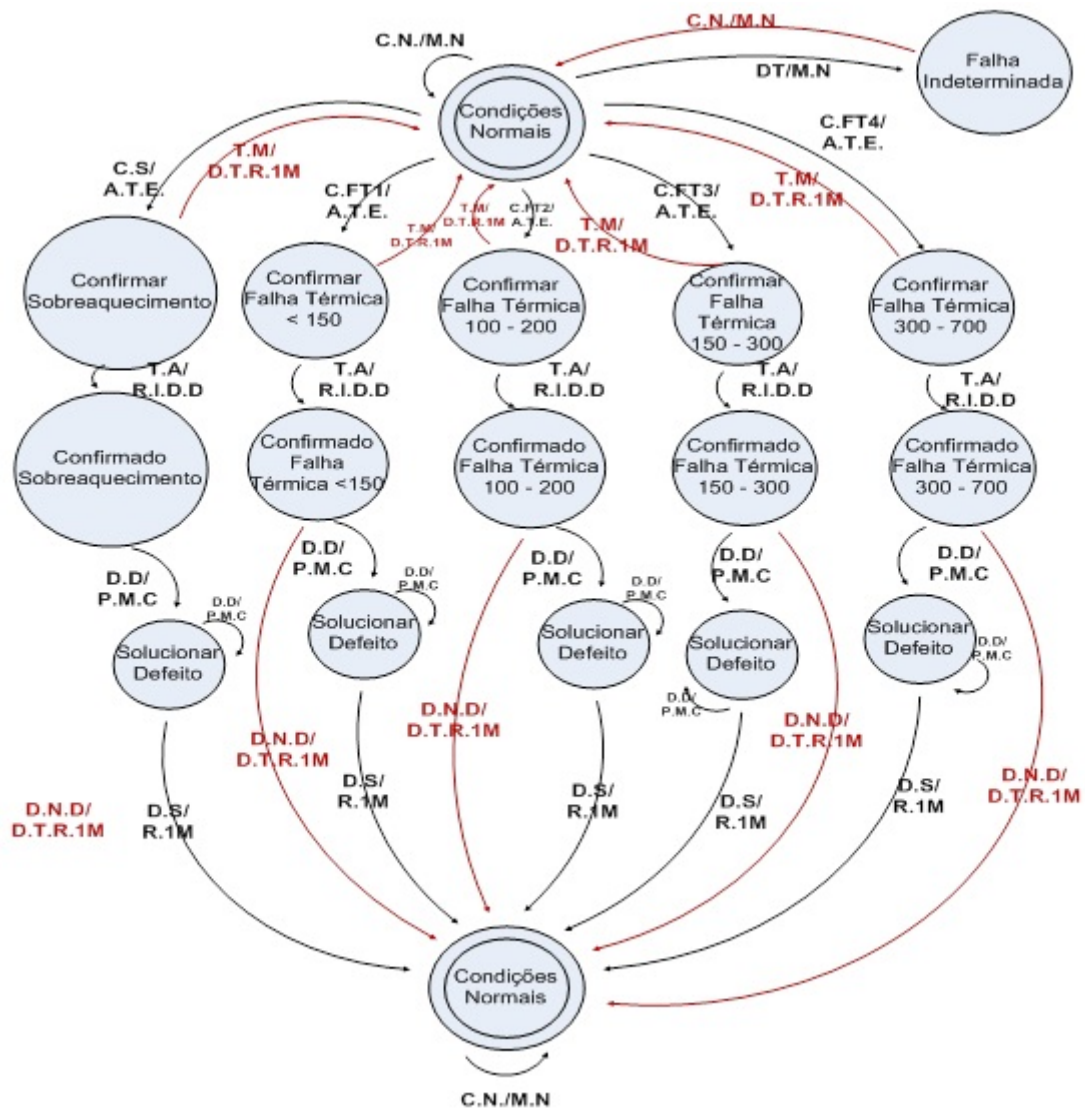


Figura B.4: Segunda parte da máquina de estado para o método de Rogers

CAUSAS	PROCEDIMENTOS
DT = Condição Falha Indeterminada	M.N = Manutenção Normal
C.DPB = Condição Descarga Parcial Baixa	A.T.E. = Analisar a Taxa de Evolução
C.DPA = Condição Descarga Parcial Alta	R.1M = Reamostrar. 1 mês
C.AB = Condição Arco Baixo	P.M.C = Programar Manutenção Corretiva
C.DB = Condição Descarga Baixa	R.I.D.D = Realizar intervenção para detecção do defeito
C.AA = Condição Arco Alto	D.T.R.1M = Desgaseificar Trafo. Reamostrar. 1 mês
C.S = Condição Sobreaquecimento	
C.FT1 = Condição Falha Térmica < 150	
C.FT2 = Condição Falha Térmica 100 - 200	
C.FT3 = Condição Falha Térmica 150 - 300	
C.FT4 = Condição Falha Térmica 300 - 700	
C.N = Condição Normal	
T.A. = Taxa de evolução > 10%	
T.M. = Taxa de evolução < 10%	
D.D = Defeito Detectado	
D.N.D = Defeito Não Detectado	
D.S = Defeito Solucionado	

Figura B.5: Legendas para a máquina de estado do método de Rogers



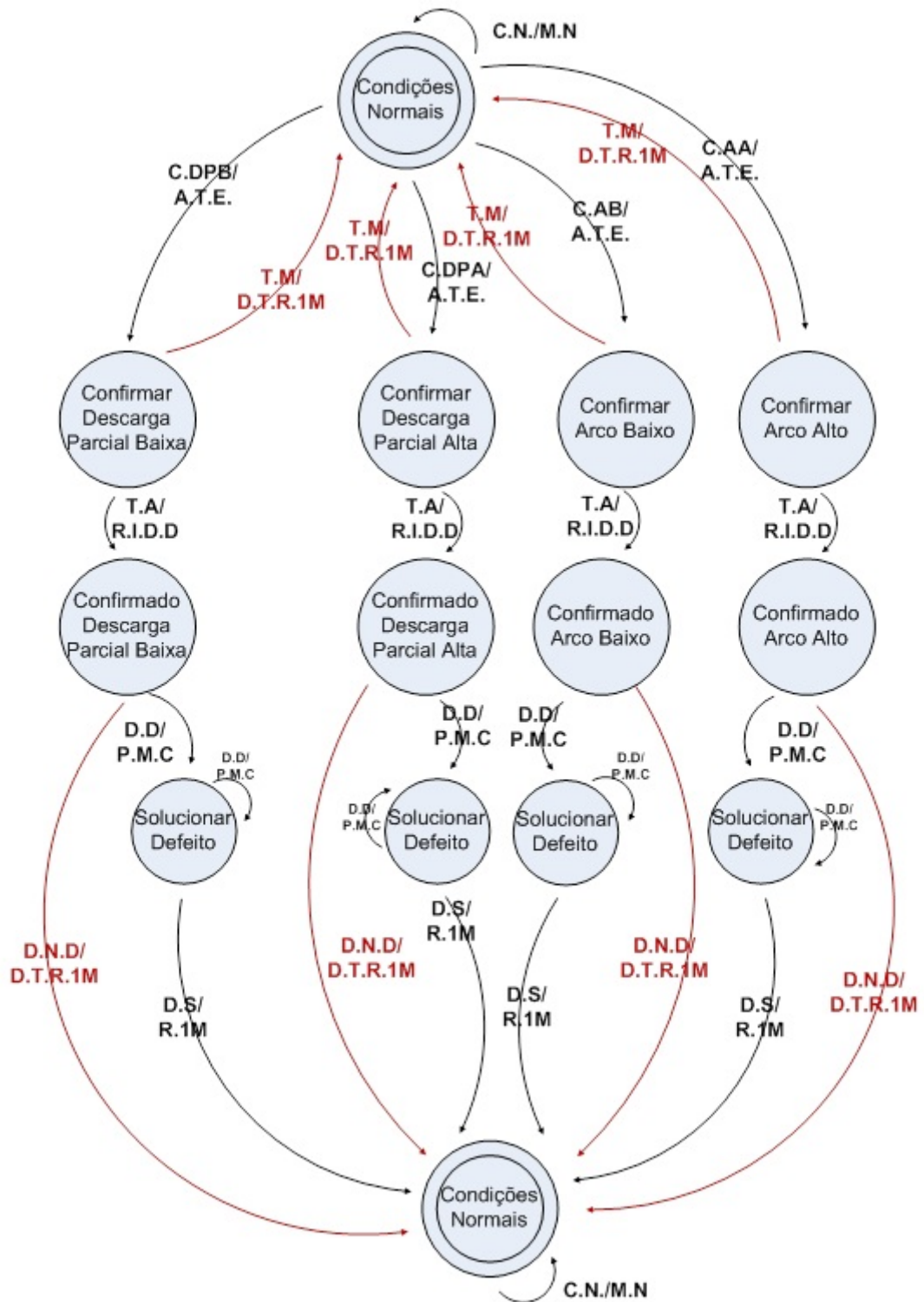


Figura B.6: Primeira parte da máquina de estado do método NBR 7274

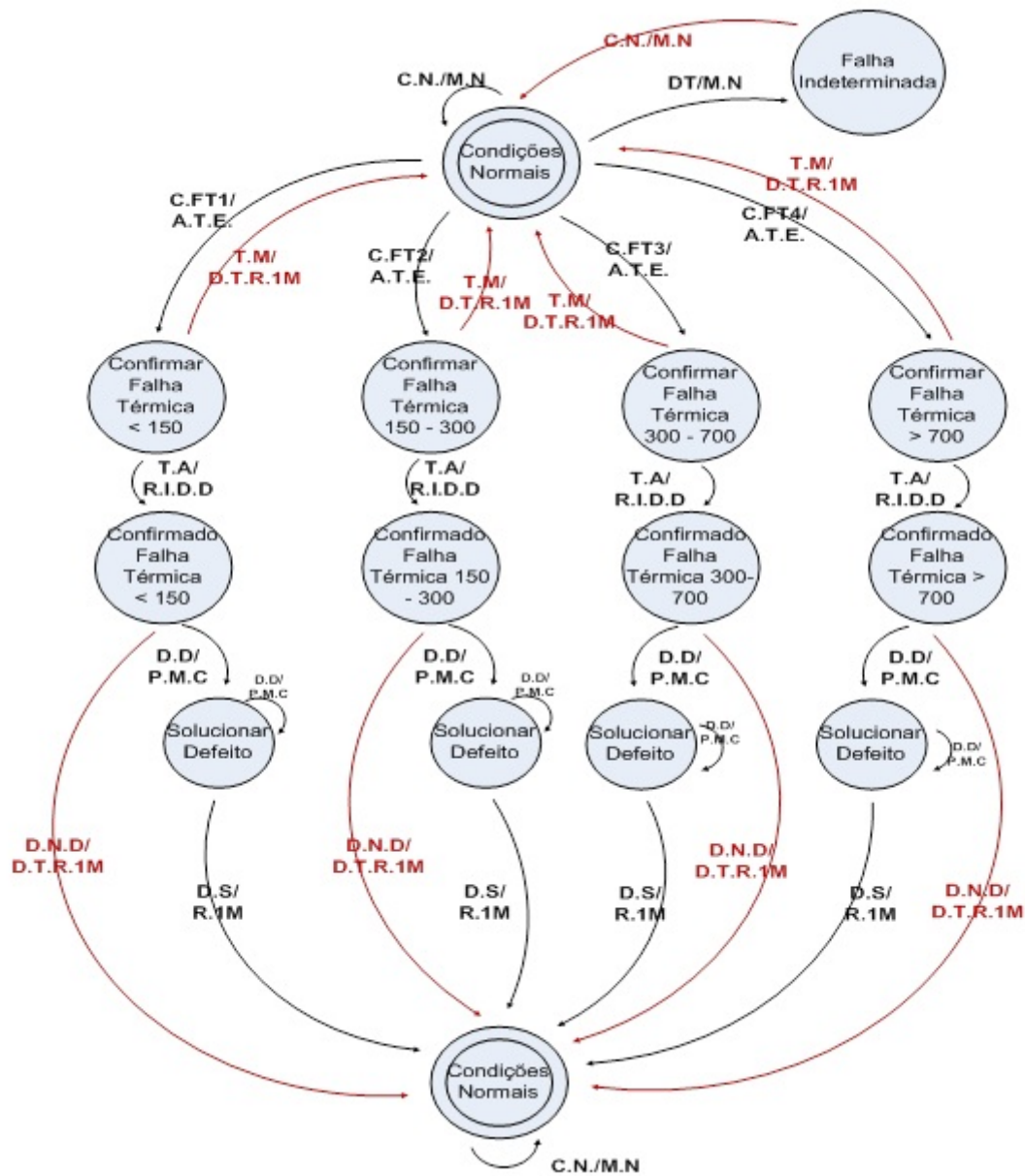


Figura B.7: Segunda parte da máquina de estado do método NBR 7274

CAUSAS
DT = Condição Falha Indeterminada
C.DPB = Condição Descarga Parcial Baixa
C.DPA = Condição Descarga Parcial Alta
C.AB = Condição Arco Baixo
C.AA = Condição Arco Alto
C.FT1 = Condição Falha Térmica < 150
C.FT2 = Condição Falha Térmica 150 - 300
C.FT3 = Condição Falha Térmica 300 - 700
C.FT4 = Condição Falha Térmica > 700
C.N = Condição Normal
T.A. = Taxa de evolução > 10%
T.M. = Taxa de evolução < 10%
D.D = Defeito Detectado
D.N.D = Defeito Não Detectado
D.S = Defeito Solucionado

PROCEDIMENTOS
M.N = Manutenção Normal
A.T.E. = Analisar a Taxa de Evolução
R.1M = Reamostrar. 1 mês
P.M.C = Programar Manutenção Corretiva
R.I.D.D = Realizar intervenção para detecção do defeito
D.T.R.1M = Desgaseificar Trafo. Reamostrar. 1 mês

Figura B.8: Legendas da máquina de estado do método NBR 7274



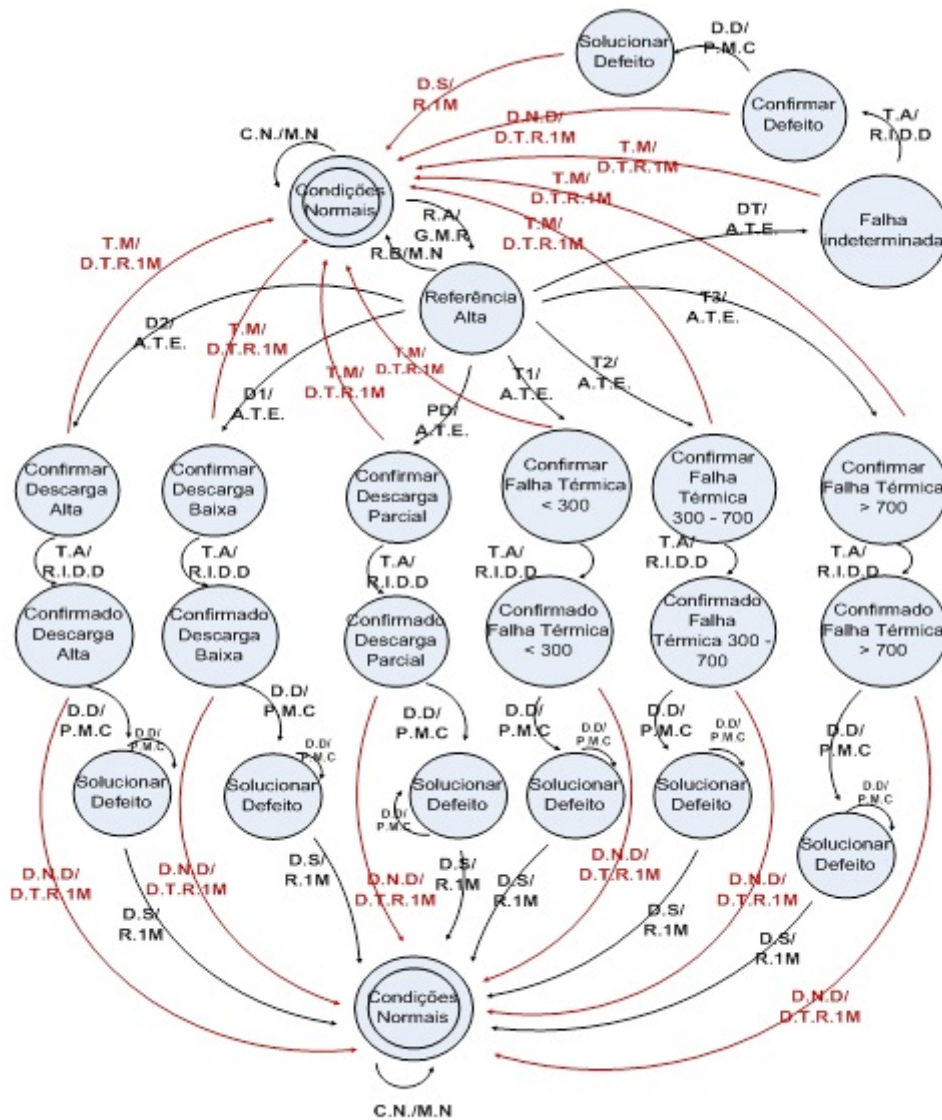


Figura B.9: Máquina de estado do método triângulo de Duval

CAUSAS
DT = Condição Falha Indeterminada
D2 = Condição Descarga Alta
D1 = Condição Descarga Baixa
PD = Condição Descarga Parcial
T1 = Condição Falha Térmica < 300
T2 = Condição Falha Térmica 300 - 700
T3 = Condição Falha Térmica > 700
C.N = Condição Normal
T.A. = Taxa de evolução > 10%
T.M. = Taxa de evolução < 10%
D.D = Defeito Detectado
D.N.D = Defeito Não Detectado
D.S = Defeito Solucionado
R.A = Referência Alta
R.B = Referência Baixa

PROCEDIMENTOS
M.N = Manutenção Normal
A.T.E. = Analisar a Taxa de Evolução
R.1M = Reamostrar, 1 mês
P.M.C = Programar Manutenção Corretiva
R.I.D.D = Realizar intervenção para detecção do defeito
D.T.R.1M = Desgaseificar Trafo, Reamostrar, 1 mês
G.M.R = Gases Maiores que a Referência

Figura B.10: Legendas da máquina de estado do método triângulo de Duval

---

## Dados Utilizados para os Teste das Máquinas de Estados

---

Os dados armazenados (da concessionária) são do ensaio cromatográfico e físico-químico; portanto, a máquina de estado do ensaio elétrico permanece apenas por definição junto com os especialistas.

Foram selecionados, aleatoriamente, cinco transformadores que possuem ambos os ensaios.

A Tabela C.1 apresenta os cinco primeiros ensaios registrados para o físico-químico.

Observa-se que existem medidas que a máquina de estado do ensaio físico-químico possui e que não estão na Tabela C.1 (GP, 2FAL, PCB, Clorado); isso porque a concessionária não possui esses outros dados armazenados ou ainda não foram disponibilizados.

Na Tabela C.2 estão os cinco primeiros dados do ensaio cromatográfico para os cinco transformadores.

**Tabela C.1:** Ensaios físico-químicos

Trafo	Data	Umidade (PPM)	Rigidez dielétrica (KV)	Fator de potência (%)	Tensão Interfacial (din/cm)	Índice de neutralização (mg KOH/g)
1	25/11/1997	38	88	0.25905	30	0.03
	28/06/1998	18.7	69	0	32.7	0.029
	18/02/1999	49.5	37	0.05705	28	0.02
	11/03/1999	20	60	0	31.4	0.02
	12/03/1999	20	60	0	31.4	0.02
2	28/03/1996	0	76	0.25805	20.2	0.087
	03/03/1997	0	57	0.25005	21	0.073
	19/03/1998	14.7	59	0.2015	22	0.085
	20/03/1998	0	74	0.2371	24.7	0.054
	15/06/1999	143	51	0.2535	23	0.08
3	15/05/1996	0	76	0.32005	18.7	0.083
	08/10/1996	0	74	0.32705	23.5	0.07
	25/11/1997	25	62	0.28205	23.3	0.085
	31/03/1999	18	67	0	24	0.07
	13/08/2001	7.2	73	0	32.5	0.02
4	20/09/1995	0	75	0.2121	23.7	0.034
	08/09/1997	0	50	0.21805	23	0.026
	06/10/1997	5	76	0.22605	23	0.03
	25/05/2000	13.2	84	0	25.1	0.03
	06/06/2001	15.1	76	0	25.3	0.03
5	04/07/1994	0	81	0.076	25.7	0.032
	18/09/1996	0	85	0.09205	25	0.032
	05/01/1998	30	50	0.10305	25	0.037
	10/11/1998	10.2	81	0.10005	28	0.035
	19/05/1999	10.6	63	0.09205	26.8	0.03

APÊNDICE C. DADOS UTILIZADOS PARA OS TESTE DAS MÁQUINAS DE ESTADOS

**Tabela C.2:** Ensaios cromatográficos

Trafo	Data	H <sub>2</sub> (PPM)	CH <sub>4</sub> (PPM)	CO (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (PPM)
1	22/12/1997	152	36	778	128	10	137
	29/12/1997	76	48	788	130	13	129
	21/12/1998	0	0	85	11	3	0
	09/08/1999	41	7	1486	68	8	0
	11/02/2000	376	43	821	146	14	109
2	06/07/1998	0	0	331	42	35	0
	08/09/1998	0	10	280	30	5	0
	08/09/1999	25	12	440	57	9	0
	03/04/2000	0	0	363	23	0	0
	19/07/2000	0	0	284	34	6	0
3	22/12/1997	0	0	388	171	0	0
	27/02/1998	0	0	668	220	0	0
	22/04/1998	0	0	458	167	16	0
	07/05/1998	0	0	458	167	16	0
	18/11/1998	0	0	600	205	33	0
4	22/12/1997	0	0	668	82	0	0
	24/10/2000	0	0	129	18	0	0
	19/06/2001	0	0	467	25	0	0
	09/06/2005	272	0	172	0	0	0
	11/05/2006	292	51	509	0	61	0
5	11/12/1997	0	17	1766	42	0	0
	01/07/1998	0	0	2259	42	0	0
	20/11/1998	0	16	1881	48	0	2
	30/07/1999	0	20	1697	110	16	0
	24/01/2000	0	0	205	11	0	0

# Referências Bibliográficas

---

---

- 1-2002, I.-C. *Guide for loading mineral-oil-immersed transformers*. Relatório Técnico, IEEE Std, 2002.
- ALMEIDA, O. M.; CARVALHO, M. F.; LIMA, S. E.; JUNIOR, E. M.; NOTTINGHAM, O. C.; CRUZ, C. M. *Monitoramento de temperatura e modelos térmicos de transformadores*. Relatório Técnico, Companhia Energética do Ceará - Coelce, 2005a.
- ALMEIDA, O. M.; LIMA, S. E.; REIS, L. L.; OLIVEIRA, J. C.; LEITE, G. C. Ferramenta para o diagnóstico de falhas em transformadores de potência utilizando dga. *III CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica*, 2005b.
- ANDRADE, F. F.; COELHO, J.; MATOS, R.; FRÖHLICH, A. A.; PIRES, R. P.; MOREIRA, W. S. Gestão e monitoração remota de transformadores em redes de distribuição de energia elétricas subterrâneas. *V WORKSPOT- International Workshop on Power Transformers*, 2008.
- ARANTES, J. G. *Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos em Óleo isolante através de redes neurais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2005.
- CHANG, C. S.; LIM, C. W.; SU, Q. Fuzzy-neural approach for dissolved gas analysis of power transformer incipient faults. *Proc. of Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004)*, p. 26–29, 2004.
- CHAVES, F. S.; VALE, M. H.; PENA, A. M.; FERREIRA, D. G. Monitrafo - ferramenta computacional aplicada à operação e manutenção de transformadores do sistema elétrico. *Proc. of XIII ERIAC - Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré*, 2009.
- DIOGO, A. C. Avaliação da vida Útil de transformadores de potência através da cromatografia líquida de alto desempenho. *Proc. do XIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1997.

- DUPONT, C. J.; CHEIM, L. A. Novo modelo para avaliação da vida remanescente de transformadores. *Proc. do XIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1997.
- DUVAL, M. Dissolved gas analysis: It can save your transformer. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 5, p. 22–27, 1989.
- ELETROPAULO *Estudo dos efeitos sinérgicos dos agentes de degradação do sistema isolante e da temperatura na vida Útil de transformadores de potência*. Relatório Técnico, ELETROPAULO, 2002.
- FONTANA, E.; ZANETTA, L. C.; VASCONCELLOS, V. *Sistema especialista para gerenciamento de sobrecargas em transformadores*. Relatório Técnico, CTEEP - Projeto nº 0068-035/2004, 2004.
- FREITAS, A. A.; SILVA, I. N.; SOUZA, A. N. Aplicação de redes neurais na estimação da temperatura interna de transformadores de distribuição imersos em Óleo. *Controle e Automação*, 13, p. 266–274, 2002.
- GODINHO, M. S. *Determinação da tensão interfacial de Óleos isolantes usando análises de imagens e espectroscopia no infravermelho próximo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Goiás, 2009.
- HAYKIN, S. *Neural network - a comprehensive foundation*. 1994.
- HOOSHMAND, R.; BANEJAD, M. Application of fuzzy logic in fault diagnosis in transformers using dissolved gas based on different standards. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006.
- IEEEC.57.115 *Guide for loading mineral-oil-immersed power transformers rated in excess of 100 mva (65°C winding rise)*. Relatório Técnico, IEEE, 1991.
- IEEESTDC57.104-1991 *Ieee guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*. Relatório Técnico, IEEE Std, 1991.
- JANG, J. S. R. Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23, p. 665–685, 1993.
- JIAJIA, Z.; HONGBIN, P.; HUIXIAN, H.; SHASHA, L. Electric power transformer fault diagnosis using ols based radial basis function neural network. *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology*, p. 1–4, 2008.
- JÚNIOR, J. T. B.; PESENTI, G. R.; CHAVES, J. A. *Influência da manutenção no Óleo isolante de transformadores de potência sobre as concentrações de furanos (fal-2)*. Relatório Técnico, LIGHT S.E.S.A, 2005.

- DE KLERK, P.; NIEUWENHUIS, H.; DE BEER, A. Transformers safely managed through on-line fault gas analysis. *Proc. of EPRI - XIII Conference Substation Equipment Diagnostics*, 2005.
- MAK, J.; FERREIRA, B. E.; MARQUES, R. C. Cálculo do desgaste de unidades transformadoras. *Anais do 2º Seminário Técnico das Empresas de Energia de São Paulo*, 1987.
- MARTINS, M. A. Furfuraldeído - um indicador prático da degradação térmica do papel kraft de transformadores. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 19, n. 1/2, 2007.
- MARTINS, M. A. Comparação da degradação térmica do sistema Óleo vegetal/papel kraft com a do Óleo mineral/papel kraft. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, v. 20, p. 15–20, 2008.
- MENG, K.; DONG, Z. Y.; WANG, D. H.; WONG, K. P. A self-adaptive rbf neural network classifier for transformer fault analysis. *Proc. of IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, p. 1350–1360, 2010.
- MILASCH, M. *Manutenção de transformadores em líquido isolante*. Edgar Blücher, 1984.
- MORAIS, D. R.; ROLIM, J. G. *Ferramenta inteligente para detecção de falhas incipientes em transformadores baseada na análise de gases dissolvidos no Óleo isolante*. Dissertação de Mestrado, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- MOREIRA, M. P.; SANTOS, L. T.; VELLASCO, M. M. Power transformers diagnosis using neural networks. *Proc. IEEE International Joint Conference on Neural Network*, p. 1929–1934, 2007.
- MUHAMAD, N. A.; PHUNG, B. T.; BLACKBURN, T. R.; LAI, K. X. Comparative study and analysis of dga methods for transformer mineral oil. *Proc. IEEE Lausanne Power Tech*, p. 45–50, 2007.
- NAVAMANY, J. S.; GHOSH, P. S. Age estimation of cellulose paper insulation in power transformers using ann. *Proc. IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing e Coil Winding Technology Conference*, p. 277–281, 2003.
- NBR12133 *Determinação do fator de perdas dielétricas - ensaios*. Relatório Técnico, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.
- NBR5416 *Aplicações de cargas em transformadores de potência*. Relatório Técnico, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1981.
- NBR5416 *Aplicação de cargas em transformadores de potência - procedimento*. Relatório Técnico, ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

- NBR7274 *Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço*. Relatório Técnico, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1981.
- NBR7274 *Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço, projeto de revisão da nbr 7274/1982*. Relatório Técnico, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.
- QI-PING, Y.; MENG-QUN, L.; XUE-YUN, M.; JUN, W. Application of artificial intelligence (ai) in power transformers fault diagnosis. *Proc. IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, v. 4, p. 442–445, 2009.
- RESEARCH, H.; GROUP, T. S. *Transformer diagnostics*. Relatório Técnico, Hydroelectric Research and Technical Services Group, 2003.
- RIBEIRO, C. J.; MARQUES, A. P.; AZEVEDO, C. H. B.; SOUZA, D. C. P.; ALVARENGA, B. P.; NOGUEIRA, R. G. Faults and defects in power transformers - a case study. *Proc. IEEE Electrical Insulation Conference*, p. 142–145, 2009.
- ROGERS, R. R. Ieee and iec codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis. *Proc. IEEE Trans. on Electrical Insulation*, v. EI 13, p. 349–354, 1978.
- SAMPAIO, R. F.; BARROSO, G. C.; LEÃO, R. P. Método de implementação de sistema de diagnóstico de falta para subestações baseados em redes de petri. *Controle e Automação*, 16, p. 417–426, 2005.
- SATYANARAYANA, K. V.; REDDY, C. C.; GOVINDAN, T. P.; MANDLIK, M.; RAMU, T. S. Application of artificial intelligence for the assessment of the status of power transformers. *Proc. IEEE Symposium on Electrical Insulation (ISIE)*, p. 104–107, 2008.
- SILVA, I. N.; SOUZA, A. N.; HOSSRI, R. M.; HOSSRI, J. H. Intelligent system applied in diagnosis of transformer. *Proc. IEE - The Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, n. 473, p. 330–334, 2000.
- SILVA, J. R. *Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- SILVA, N.; SOUZA, N.; ULSON, J. A.; FLAUZINO, R. A. Técnicas de sistemas inteligentes aplicadas na identificação do envelhecimento de transformadores. *XVI SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2001.
- SPURGEON, K.; TANG, W. H.; WU, Q. H.; RICHARDSON, Z. J.; MOSS, G. Dissolved gas analysis using evidential reasoning. *IEE Proc. on Science, Measurement and Technology*, v. 152, n. 3, p. 110–117, 2005.



- 
- ZHOU, Z. H.; CHEN, Z. Q.; CHEN, S. F. Condition monitoring of power transformers with neural networks. *Proc. IEEE International Conference on Info-tech and Info-net*, v. 3, p. 468–472, 2001.
- ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamento de papel impregnado com Óleo mineral. *Controle e Automação*, 16, p. 318–331, 2005.