



---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

---

**METODOLOGIA DE GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE REATORES**

**VANESSA DE CÁSSIA VIANA MARTINS BELTRÃO**

**DM: 27 / 2014**

---

**UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2014**

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

---

**VANESSA DE CÁSSIA VIANA MARTINS BELTRÃO**

**METODOLOGIA DE GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE REATORES**

**DM: 27 / 2014**

---

**UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2014**

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

---

**VANESSA DE CÁSSIA VIANA MARTINS BELTRÃO**

**METODOLOGIA DE GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE REATORES**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistema de Energia Elétrica

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Beltrão, Vanessa de Cássia Viana Martins, 1978 -  
Metodologia de Gestão do Ciclo de Vida de Reatores /  
Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão. - 2014.

Orientador: João Paulo Abreu Vieira.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade  
Federal do Pará, Instituto de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica, Belém, 2014.

1. Subestações elétricas - equipamentos e  
acessórios 2. Confiabilidade (Engenharia). 3.  
Ciclo de vida do produto 4. Reatores elétricos  
- testes. I. Título.

CDD 22. ed. 621.3126

---

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

---

**METODOLOGIA DE GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE REATORES**

**AUTOR: VANESSA DE CÁSSIA VIANA MARTINS BELTRÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

**APROVADA EM:** 05 / 09 / 2014

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

---

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

---

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carminda Célia Moura de Moura Carvalho  
(Avaliadora Externa ao Programa – FEE/UFPA)

**VISTO:**

---

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

*A minha mãe, que acreditou no meu potencial e me ensinou a encarar a vida com dignidade.*

*A minha família, pela paciência e apoio durante a realização deste trabalho.*

*Aos amigos, pela credibilidade e incentivo nos momentos difíceis.*

“Mares calmos não fazem bons marinheiros”.

**Anônimo**

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me concedeu saúde e perseverança para a conclusão deste trabalho, superando os momentos difíceis.

A minha mãe que foi a grande responsável por tudo que conquistei na minha vida acadêmica.

Ao meu esposo e minha filha que compreenderam a minha ausência durante os finais de semana e noites de estudos.

Ao professor Dr. João Paulo pela orientação, atenção, sugestões e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará – UFPA, pelos ensinamentos e pela oportunidade desta realização acadêmico-profissional.

À Eletrobras – Eletronorte pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos e por todo o subsídio na realização deste trabalho de pesquisa. Em especial, ao gerente da Divisão de Engenharia de Manutenção e Operação, Luiz Fernando Teixeira de Souza, pela boa vontade em colaborar e apoiar-me durante todos os momentos de pesquisa.

Aos amigos da “pós”, de dentro e de fora da Eletronorte, adquiridos nesta etapa da vida que muitas vezes me incentivaram e contribuíram no cumprimento deste trabalho, ajudando nas correções e nas inúmeras discussões sobre o assunto.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xvi
LISTA DE TABELAS .....	xx
1 Introdução .....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.1.1 Remuneração dos ativos do setor elétrico.....	1
1.1.2 Gestão dos ativos do setor elétrico.....	3
1.2 Motivações .....	5
1.3 Objetivos .....	6
1.4 Revisão bibliográfica .....	6
1.5 Estrutura do trabalho.....	9
2 Reatores em Derivação .....	11
2.1 Função dos reatores em derivação no sistema elétrico .....	11
2.2 Requisitos operacionais .....	13
2.2.1 Tolerância do valor da reatância.....	13
2.2.2 Regime de operação .....	14
2.3 Tipos de reatores .....	15
2.3.1 Tipos de ligação.....	15
2.3.2 Tipos de localização .....	15
2.3.3 Tipos de núcleo .....	16
2.3.4 Tipos de construção .....	16
2.4 Aspectos construtivos dos reatores .....	16
2.4.1 Parte ativa .....	17
2.4.1.1 Núcleo.....	19
2.4.1.2 Enrolamentos .....	20
2.4.2 Sistema de preservação de líquido isolante .....	21
2.4.2.1 Tanque principal.....	21
2.4.2.2 Tanque de expansão .....	22
2.4.2.3 Bolsa de borracha ou membrana .....	22
2.4.2.4 Secador de ar.....	23
2.4.3 Sistema de refrigeração.....	24

2.4.3.1	Radiadores.....	25
2.4.3.2	Bombas de circulação de óleo .....	26
2.4.3.3	Ventiladores .....	26
2.4.4	Acessórios .....	27
2.4.4.1	Buchas .....	27
2.4.4.2	Termômetros.....	29
2.4.4.3	Válvulas.....	30
2.4.4.4	Vedações .....	31
2.4.4.5	Indicador de nível de óleo .....	32
2.4.4.6	Relé de gás.....	33
2.4.4.7	Dispositivo de alívio de pressão.....	34
2.4.4.8	Indicador de fluxo.....	35
2.4.4.9	Painel de controle .....	36
2.4.5	Sistema de isolamento.....	36
2.4.5.1	Isolação sólida .....	37
2.4.5.2	Óleo mineral isolante .....	38
3	Ciclo de vida de reatores .....	41
3.1	Ciclo de vida.....	41
3.2	Expectativa de vida .....	44
3.3	Envelhecimento do reator .....	46
3.3.1	Degradação do óleo isolante .....	46
3.3.2	Degradação do papel isolante .....	49
3.4	Fatores agravantes para o envelhecimento do reator.....	57
3.4.1	Carregamento.....	57
3.4.2	Sobretensão .....	62
3.5	Definição de vida útil restante .....	66
3.5.1	Modelização química para determinação de GP .....	66
3.5.2	Análise de compostos furânicos e sua correlação com GP.....	69
3.5.3	Medição direta do GP em amostras coletadas .....	70
3.6	Avaliação e controle da umidade .....	71
3.6.1	Avaliação da umidade no papel aplicando diagramas de equilíbrio .....	71
3.6.2	Avaliação da umidade no papel aplicando métodos de ensaios elétricos ..	74
4	Métodos de detecção de falha .....	75
4.1	A manutenção no setor elétrico.....	75

4.1.1	Manutenção corretiva .....	77
4.1.2	Manutenção preventiva .....	77
4.1.3	Manutenção preditiva .....	78
4.2	Tipos de ensaios em reatores .....	79
4.2.1	Ensaio de fábrica .....	79
4.2.1.1	Ensaio de rotina .....	79
4.2.1.2	Ensaio de tipo.....	80
4.2.1.3	Ensaio especiais .....	80
4.2.2	Ensaio de campo .....	81
4.2.2.1	Ensaio de comissionamento.....	81
4.2.2.2	Ensaio de rotina .....	81
4.2.2.3	Ensaio de especiais .....	82
4.3	Ensaio de campo em reatores.....	82
4.3.1	Ensaio físico-químicos .....	82
4.3.2	Ensaio gascromatográficos.....	85
4.3.2.1	Diagnóstico a partir da taxa de evolução de gás.....	87
4.3.2.2	Método ANSI / IEEE C57.104 .....	88
4.3.2.3	Método de Duval .....	89
4.3.2.4	Método IEC 60599 .....	90
4.3.2.5	Método de Rogers.....	91
4.3.2.6	Método da ABNT / NBR 7274 .....	92
4.3.2.7	Método do gás chave.....	94
4.3.2.8	Critério Laborelec.....	95
4.3.2.9	Método de Doernenburg .....	97
4.3.3	Ensaio de furfuraldeído.....	97
4.3.4	Ensaio de fator de potência e capacitância .....	99
4.3.5	Ensaio de resistência ôhmica .....	102
4.3.6	Ensaio de resistência de isolamento DC .....	102
4.3.7	Medição de descargas parciais .....	105
4.3.8	Análise de resposta dielétrica - Dirana .....	111
4.3.9	Análise da resposta em frequência.....	118
4.3.10	Ensaio de termografia.....	122
4.3.11	Ensaio de emissão acústica .....	125
4.3.12	Ensaio de vibração e ruído .....	126

5	Metodologia de avaliação da condição dos reatores .....	130
5.1	Avaliação da condição .....	130
5.2	Sistema de avaliação por múltiplos agentes .....	130
5.3	Estruturação da metodologia .....	132
5.4	Critérios de interpretação dos agentes.....	141
5.4.1	Critérios físico-químicos .....	142
5.4.2	Critérios gascromatográficos .....	142
5.4.3	Critérios de furfuraldeído .....	143
5.4.4	Critérios de fator de potência.....	143
5.4.5	Critérios de capacitância .....	144
5.4.6	Critérios de resistência de ôhmica.....	145
5.4.7	Critérios de resistência de isolamento DC.....	146
5.4.8	Critérios do índice de absorção .....	146
5.4.9	Critérios do índice de polarização.....	147
5.4.10	Critérios para análise da resposta do dielétrico .....	147
5.4.11	Critérios para análise da resposta em frequência.....	148
5.4.12	Critérios para impedância terminal .....	149
5.4.13	Critérios de vibração e ruído.....	150
5.4.14	Critérios para avaliação do carregamento .....	150
6	Aplicação da metodologia da avaliação da condição em reatores.....	152
6.1	Caracterização dos reatores .....	152
6.2	Avaliação físico-química.....	152
6.3	Avaliação gascromatográfica .....	153
6.4	Avaliação furfuraldeído.....	155
6.5	Avaliação do fator de potência e capacitância .....	156
6.6	Avaliação de resistência ôhmica .....	157
6.7	Avaliação da resistência de isolamento DC .....	158
6.8	Avaliação dos índices de absorção e polarização.....	158
6.9	Avaliação da análise da resposta do dielétrico .....	159
6.10	Avaliação da análise de resposta em frequência.....	161
6.11	Avaliação da impedância terminal .....	164
6.12	Avaliação da vibração e ruído.....	166
6.13	Avaliação do carregamento .....	167
6.14	Avaliação geral dos reatores.....	168

6.15	Intervenção com base nos resultados obtidos .....	171
6.15.1	Inspeção interna do Reator 07.....	171
6.15.2	Intervenção para restauração do Reator 10 .....	174
7	Conclusões .....	177
7.1	Conclusões Gerais .....	177
7.2	Perspectivas de Trabalhos Futuros.....	180
APÊNDICE 1:	Avaliação dos reatores por catorze agentes .....	181
APÊNDICE 2:	Índice da condição para o Reator 07.....	182
APÊNDICE 3:	Índice da condição para o Reator 10 .....	183
APÊNDICE 4:	Avaliação da condição dos reatores .....	184
BIBLIOGRAFIA	.....	185

## Resumo

Nos sistemas elétricos de potência, os reatores em derivação são os equipamentos responsáveis pela redução ou mesmo anulação dos efeitos capacitivos indesejáveis na operação das linhas. Percebe-se, então, a importância desses equipamentos e a necessidade de mantê-los em perfeito funcionamento, pois uma falha grave gera um elevado custo de manutenção corretiva, queda nos indicadores de desempenho, além de multas por parte da agência reguladora - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. O ciclo de vida de um reator em derivação envolve oito etapas - Planejamento, Especificação, Aquisição, Fabricação, Instalação, Comissionamento, Exploração e Desclassificação. Neste trabalho serão abordados apenas aspectos relativos à gestão da fase de exploração, que contempla o conjunto de processos de operação e manutenção de acordo com as perspectivas da empresa onde este estudo foi realizado. O processo de envelhecimento do reator pode ocorrer de diversas maneiras, no entanto o tempo de vida útil de um reator é condicionado essencialmente por dois fatores: a velocidade de envelhecimento e perda de robustez dos seus materiais e componentes e, as condições de funcionamento a que está sujeito ao longo do tempo. Para evitar danos aos reatores, as empresas de energia elétrica têm adotado procedimentos de manutenção preventivo e preditivo, que quando baseados em diagnósticos de diferentes métodos de avaliação tem um impacto fundamental na vida útil e confiabilidade dos reatores. Sendo a condição de degradação de um reator um processo contínuo no tempo, este pode ser classificado em cinco estágios: Novo, Normal, Anormal, Defeituoso e Falhado. Um índice de condição (IC) pode ser atribuído a cada um destes estágios de degradação, de acordo com os resultados de um conjunto de testes de diagnósticos para análise do estado de operação do reator e estimativa da sua posição atual em relação ao seu ciclo de vida. Esta dissertação trata do desenvolvimento de uma metodologia para sistematizar a análise com a combinação de catorze diferentes métodos de diagnósticos e mapear os resultados em um modelo de condição que oriente o ciclo de vida do reator. A metodologia foi aplicada em dez reatores de 500 kV em duas subestações da Eletrobras-Eletronorte no Sistema de Transmissão do Pará, empresa na qual foi realizado este estudo.

**Palavras-chave:** Reator em derivação, Ciclo de vida, Avaliação da condição.

## Abstract

*In electric power systems, the shunt reactors are the equipment responsible for the reduction or even cancellation of undesirable capacitive effects in the operation of the lines. Then one realizes the importance of such equipment and the need to keep them running smoothly. A major fault generates a high cost of corrective maintenance, drop in performance indicators, in addition to fines by the regulator - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. The life cycle of a shunt reactor involves eight steps - Planning, Specification, Procurement, Fabrication, Installation, Commissioning, Operation and Decommissioning. In this work will be addressed aspects only of the management of the exploration phase, which includes the set of processes and operation maintained according to the perspectives of the company where this study was conducted. The aging of the reactor can occur in various ways, however the lifetime of a reactor is mainly conditioned by two factors: the speed of aging and loss of robustness of its materials and components, and the operating conditions imposed on it over time. To avoid damage to the reactors, the electric companies have adopted procedures for preventive and predictive maintenance, which, when based on diagnoses of different evaluation methods have a fundamental impact on the life and reliability of the reactors. As a condition of degradation of a reactor is a continuous process in time, this can be classified into five stages: new, normal, abnormal, defective and failed. A condition index (CI) can be attributed to each of these stages of degradation, according to results of diagnostic tests to analyze the state of reactor operation and estimation of its current position in relation to its life cycle. This dissertation deals with the development of a methodology for the systematic analysis by combining fourteen different diagnostic methods and map the results to a model of condition that guide the life cycle of the reactor. The methodology was applied in ten reactors of 500 kV in two Eletrobras-Eletronorte substations in Transmission System of Pará, company where this study was conducted.*

**Keywords:** *Shunt reactor, Life cycle, Evaluation of the condition*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Manutenção e a PVI.....	3
<b>Figura 2.1:</b> Sistema elétrico e fluxo de potência ativa e reativa.....	11
<b>Figura 2.2:</b> Linha de transmissão: carga e perfil da tensão .....	12
<b>Figura 2.3:</b> Linha de transmissão com compensação reativa através de reatores...	13
<b>Figura 2.4:</b> Reatores em derivação 525 kV – 60 MVar e 50 MVar .....	15
<b>Figura 2.5:</b> Sistema elétrico de potência e reator em derivação.....	16
<b>Figura 2.6:</b> Principais componentes do reator em derivação.....	17
<b>Figura 2.7:</b> Parte ativa do reator em derivação .....	17
<b>Figura 2.8:</b> Sistema de preservação de líquido isolante .....	21
<b>Figura 2.9:</b> Tanque de expansão (a) sem acessório (b) com membrana .....	23
<b>Figura 2.10:</b> Secador de ar.....	23
<b>Figura 2.11:</b> Sistema Pulmãotec de selagem .....	24
<b>Figura 2.12:</b> Sistema de refrigeração .....	25
<b>Figura 2.13:</b> Principais componentes de uma bucha OIP .....	28
<b>Figura 2.14:</b> Termômetro (a) eletromecânico, (b) eletrônico .....	29
<b>Figura 2.15:</b> Indicador de nível de óleo .....	32
<b>Figura 2.16:</b> Relé detector de gás .....	33
<b>Figura 2.17:</b> Dispositivo de alívio de pressão .....	35
<b>Figura 2.18:</b> Interior de um painel de controle .....	36
<b>Figura 3.1:</b> Ciclo de vida do reator em derivação .....	42
<b>Figura 3.2:</b> Atividades e processos na fase de exploração .....	43
<b>Figura 3.3:</b> Fórmula estrutural de OMI.....	46
<b>Figura 3.4:</b> Fórmula estrutural da celulose .....	50
<b>Figura 3.5:</b> Pirólise do papel <i>Kraft</i> em sistema fechado e livre de oxigênio. Número de quebras ( $\eta_b$ ) por cadeia a 150 e 180°C .....	51
<b>Figura 3.6:</b> Tensão de tração versus o tempo .....	52
<b>Figura 3.7:</b> Efeito da umidade na vida do papel isolante imerso em óleo .....	53
<b>Figura 3.8:</b> Vida do isolamento de celulose versus a temperatura .....	54
<b>Figura 3.9:</b> Curva de expectativa de vida .....	57
<b>Figura 3.10:</b> Curva de carga diária de um reator.....	58
<b>Figura 3.11:</b> Carregamentos recomendados pela norma IEEE Std C57.91 .....	62
<b>Figura 3.12:</b> Gráfico de Arrhenius .....	67

<b>Figura 3.13:</b> Gráfico de Arrhenius sobrepondo os mecanismos de envelhecimento.....	68
<b>Figura 3.14:</b> Curvas de expectativa de vida útil com base nos modelos de variação de GP .....	69
<b>Figura 3.15:</b> Diagrama de equilíbrio de umidade papel-óleo .....	72
<b>Figura 3.16:</b> Umidade de saturação versus tipo de óleo e temperatura .....	72
<b>Figura 3.17:</b> Relação da umidade no papel com a saturação relativa e a temperatura ..	73
<b>Figura 4.1:</b> Evolução da Manutenção.....	76
<b>Figura 4.2:</b> Evolução da manutenção no setor elétrico .....	76
<b>Figura 4.3:</b> Esquema de procedimentos de manutenção .....	79
<b>Figura 4.4:</b> Geração de gases dependendo da temperatura do óleo .....	86
<b>Figura 4.5:</b> Triângulo de Duval .....	90
<b>Figura 4.6:</b> Correlação entre o teor de furfuraldeído e o GP de acordo com Burton .....	98
<b>Figura 4.7:</b> Circuito equivalente simplificado de um dielétrico.....	99
<b>Figura 4.8:</b> Componentes vetoriais da tensão de teste e da correntes em um circuito R/C paralelo .....	100
<b>Figura 4.9:</b> Isolamento de um reator monofásico .....	100
<b>Figura 4.10:</b> Tabela de multiplicadores para correção do fator de potência a 20°C .....	102
<b>Figura 4.11:</b> Componentes de corrente no ensaio de resistência do isolamento DC ...	103
<b>Figura 4.12:</b> Comportamento típico de ensaio de resistência do isolamento DC ...	104
<b>Figura 4.13:</b> IP vs Teor de umidade .....	105
<b>Figura 4.14:</b> (a) Descarga superficial; (b) Descarga externa; (c) Descarga interna .....	105
<b>Figura 4.15:</b> Representação de esquema microprocessado de medida de descargas parciais.....	107
<b>Figura 4.16:</b> Processamento de dados de DP em canais múltiplos com 3 unidades de aquisição de DP .....	107
<b>Figura 4.17:</b> Criação de 3PARD usando sinais de tensão de Descargas Parciais. ....	107
<b>Figura 4.18:</b> Diferenças de tempo entre os 3 pulsos de DP dentro do segmento L1 ...	108
<b>Figura 4.19:</b> Representação FFT para pulsos de DP com três filtros de passagem de banda .....	108
<b>Figura 4.20:</b> Representação de 3PARD com a separação dos sinais individuais ..	108
<b>Figura 4.21:</b> Sonda UHF.....	110
<b>Figura 4.22:</b> Representação do isolamento de um transformador.....	111
<b>Figura 4.23:</b> Esquema de medição para um reator .....	112
<b>Figura 4.24:</b> Espectroscopia do domínio de frequência .....	113

<b>Figura 4.25:</b> Correntes de polarização e despolarização de um sistema de isolamento.....	114
<b>Figura 4.26:</b> Arranjos e modelos de um sistema de isolação .....	114
<b>Figura 4.27:</b> Interpretação das correntes de polarização e despolarização .....	115
<b>Figura 4.28:</b> Ciclos durante a medição da tensão de retorno .....	116
<b>Figura 4.29:</b> Espectro de Polarização .....	116
<b>Figura 4.30:</b> Tensão de Retorno vs Grau de Polimerização.....	117
<b>Figura 4.31:</b> Espectro de Polarização Típico vs Com umidade.....	117
<b>Figura 4.32:</b> Método da resposta ao impulso .....	119
<b>Figura 4.33:</b> Método da resposta por varredura em frequências.....	119
<b>Figura 4.34:</b> Medição de SFRA .....	121
<b>Figura 4.35:</b> Interpretação das faixas de frequências.....	122
<b>Figura 4.36:</b> Distribuição da medida no range de frequências .....	122
<b>Figura 4.37:</b> Esquema de direcionamento da radiação .....	123
<b>Figura 4.38:</b> Distribuição espectral de diferentes emissividades .....	123
<b>Figura 4.39:</b> Termograma indicando problema na conexão da bucha do reator ....	124
<b>Figura 4.40:</b> Termograma de um reator .....	124
<b>Figura 4.41:</b> Distribuição de sensores para medição de emissão acústica .....	125
<b>Figura 4.42:</b> Diagrama esquemático para análise de vibração em um equipamento...	127
<b>Figura 4.43:</b> Pontos de medição de vibração .....	128
<b>Figura 4.44:</b> Desenho esquemático de um sensor de: (a) deslocamento, (b) velocidade, (c) aceleração.....	128
<b>Figura 5.1:</b> Definição do IC por múltiplos agentes.....	131
<b>Figura 5.2:</b> Hierarquia do Índice de Condição com Estágios e Estados.....	132
<b>Figura 5.3:</b> Estágios discretos da degradação de um reator .....	132
<b>Figura 5.4:</b> Diagrama de bloco para obtenção do IC. Adaptado.....	132
<b>Figura 5.5:</b> Definição do Índice da Condição (IC) de um reator.....	140
<b>Figura 5.6:</b> Classificação do teor de umidade .....	148
<b>Figura 5.7:</b> Avaliação de SFRA em médias frequências .....	149
<b>Figura 6.1:</b> Fator de potência e capacitância com variação de frequência Reator 07 ..	157
<b>Figura 6.2:</b> Fator de potência e capacitância com variação de frequência Reator 10 ..	157
<b>Figura 6.3:</b> Curva de resistência do isolamento DC de reatores .....	158
<b>Figura 6.4:</b> Diagnóstico da resposta do dielétrico para o Reator 07 .....	159
<b>Figura 6.5:</b> Diagnóstico da resposta do dielétrico para o Reator 10.....	160

<b>Figura 6.6:</b> Diagnóstico da resposta do dielétrico para a bucha do Reator 07 .....	160
<b>Figura 6.7:</b> Diagnóstico da resposta do dielétrico para a bucha do Reator 10 .....	161
<b>Figura 6.8:</b> Comparação entre os reatores 06 e 07 .....	162
<b>Figura 6.9:</b> Comparação entre os reatores 05 e 06 .....	163
<b>Figura 6.10:</b> Comparação entre os reatores 09 e 10 .....	164
<b>Figura 6.11:</b> Comparação entre os reatores 04, 05 e 07 .....	165
<b>Figura 6.12:</b> Comparação entre os reatores 08 e 10 .....	166
<b>Figura 6.13:</b> Nível de carregamento do Reator 07 .....	168
<b>Figura 6.14:</b> Nível de carregamento do Reator 10 .....	168
<b>Figura 6.15:</b> Avaliação dos reatores por catorze agentes .....	169
<b>Figura 6.16:</b> Índice da condição para o Reator 07 .....	169
<b>Figura 6.17:</b> Ciclo de vida do Reator 07 .....	170
<b>Figura 6.18:</b> Índice da condição para o Reator 10 .....	170
<b>Figura 6.19:</b> Ciclo de vida do Reator 10 .....	170
<b>Figura 6.20:</b> Conexão da bucha de alta tensão com o enrolamento .....	171
<b>Figura 6.21:</b> Pontos de queima de papel isolante .....	172
<b>Figura 6.22:</b> Papel isolante carbonizado .....	172
<b>Figura 6.23:</b> Rompimento da conexão do terminal da bucha de alta com o enrolamento .....	172
<b>Figura 6.24:</b> Fiação proveniente do enrolamento rompida .....	173
<b>Figura 6.25:</b> Remoção do papel isolante do terminal de conexão da bucha .....	173
<b>Figura 6.26:</b> Terminal de conexão da bucha de alta tensão danificado .....	173
<b>Figura 6.27:</b> Vista do Reator 07 e equipamentos adjacentes .....	174
<b>Figura 6.28:</b> Diagrama do processo <i>Hot Oil Spray</i> .....	175
<b>Figura 6.29:</b> Avaliação da condição dos reatores .....	175
<b>Figura 6.30:</b> Índice da condição dos dez reatores .....	176

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1:</b> Requisitos mínimos recomendados para OMI em equipamentos novos .....	47
<b>Tabela 3.2:</b> Produtos da oxidação do óleo mineral isolante .....	48
<b>Tabela 3.3:</b> Vida do isolamento sólido .....	55
<b>Tabela 3.4:</b> Valores de referência para o cálculo da expectativa de vida .....	56
<b>Tabela 3.5:</b> Alteração do carregamento com relação à temperatura ambiente .....	59
<b>Tabela 3.6:</b> Temperaturas limite por carregamento .....	60
<b>Tabela 3.7:</b> Fator ambiental “A” estimado para $E_a$ de 111kJ/mole .....	68
<b>Tabela 3.8:</b> Critérios para interpretar resultados da medição em saturação relativa do óleo .....	73
<b>Tabela 4.1:</b> Requisitos para os ensaios dielétricos .....	80
<b>Tabela 4.2:</b> Valores limites para óleo em serviço – reator .....	85
<b>Tabela 4.3:</b> Classificação dos gases dissolvidos no óleo .....	86
<b>Tabela 4.4:</b> Valores internacionalmente considerados de referência (ppm vol/vol) ..	88
<b>Tabela 4.5:</b> Diagnósticos propostos pela ANSI/IEEE C57.104 .....	89
<b>Tabela 4.6:</b> Limites por zona.....	90
<b>Tabela 4.7:</b> Interpretação dos gases segundo IEC 60599.....	91
<b>Tabela 4.8:</b> Especificação dos códigos do método Rogers .....	91
<b>Tabela 4.9:</b> Diagnóstico de falhas do método Rogers .....	92
<b>Tabela 4.10:</b> Diagnóstico de falhas NBR 7274 .....	93
<b>Tabela 4.11:</b> Relações características entre gases .....	94
<b>Tabela 4.12:</b> Perfis típicos de composição .....	95
<b>Tabela 4.13:</b> Tipos de falhas – Laborelec.....	96
<b>Tabela 4.14:</b> Método de identificação de falha de Doernenburg.....	97
<b>Tabela 4.15:</b> Concentração dos gases para validação do método de Doernenburg .....	97
<b>Tabela 4.16:</b> Critérios de avaliação de buchas a 60 Hz.....	101
<b>Tabela 4.17:</b> Tabela orientativa para diagnóstico da isolação de reatores .....	104
<b>Tabela 4.18:</b> Coordenadas cartesianas dos sensores em relação à origem .....	126
<b>Tabela 4.19:</b> Níveis de ruído para reatores em óleo com potência $\geq 12500$ kVAr ..	129
<b>Tabela 5.1:</b> Matriz de detecção e diagnóstico de falhas - MDDF.....	133
<b>Tabela 5.2:</b> FMEA para reator .....	134
<b>Tabela 5.3:</b> Vetores de estágio para reator .....	136
<b>Tabela 5.4:</b> Matriz de escolha de estágio para reator.....	137

<b>Tabela 5.5:</b> Matriz de escolha de estágio para reator .....	138
<b>Tabela 5.6:</b> Consenso de estágio para reator .....	138
<b>Tabela 5.7:</b> Matriz de escolha de estado para reator .....	139
<b>Tabela 5.8:</b> Consenso de estado para reator .....	140
<b>Tabela 5.9:</b> Índice da condição para reator .....	141
<b>Tabela 5.10:</b> Critérios de interpretação do agente físico-químico do óleo isolante ..	142
<b>Tabela 5.11:</b> Critérios de interpretação para as concentrações individuais de gases ..	142
<b>Tabela 5.12:</b> Critérios de interpretação para compostos furânicos .....	143
<b>Tabela 5.13:</b> Critérios de interpretação de fator de potência em reatores a óleo ...	144
<b>Tabela 5.14:</b> Critérios de interpretação de capacitância em reatores .....	145
<b>Tabela 5.15:</b> Critérios de interpretação de resistência ôhmica de enrolamento .....	145
<b>Tabela 5.16:</b> Critérios de interpretação de resistência de isolamento DC .....	146
<b>Tabela 5.17:</b> Critérios de interpretação do índice de absorção .....	147
<b>Tabela 5.18:</b> Critérios de interpretação do índice de polarização .....	147
<b>Tabela 5.19:</b> Critérios de interpretação para a isolação sólida .....	148
<b>Tabela 5.20:</b> Avaliação de enrolamentos de acordo com a norma DL/T911-2004 ..	149
<b>Tabela 5.21:</b> Critérios de interpretação para vibração e ruído .....	150
<b>Tabela 5.22:</b> Critérios de interpretação para as curvas de carregamento .....	150
<b>Tabela 6.1:</b> Reatores de 525 kV avaliados .....	152
<b>Tabela 6.2:</b> Histórico físico-químico do Reator 07 .....	153
<b>Tabela 6.3:</b> Histórico físico-químico do Reator 10 .....	153
<b>Tabela 6.4:</b> Histórico gascromatográfico do Reator 07 .....	154
<b>Tabela 6.5:</b> Histórico gascromatográfico do Reator 10 .....	155
<b>Tabela 6.6:</b> Histórico furfuraldeído dos Reatores 07 e 10 .....	156
<b>Tabela 6.7:</b> Histórico de fator de potência e capacitância de reatores .....	156
<b>Tabela 6.8:</b> Resistência ôhmica de reatores .....	157
<b>Tabela 6.9:</b> Resistência de isolamento DC de reatores .....	158
<b>Tabela 6.10:</b> Índices de Absorção e Polarização dos reatores .....	159
<b>Tabela 6.11:</b> Vibração e ruído do Reator 7 .....	167
<b>Tabela 6.12:</b> Vibração e ruído do Reator 10 .....	167

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

A reestruturação do setor elétrico brasileiro, através do Projeto RE-SEB 1996-1998, foi marcada por políticas regulatórias e pela implantação de um modelo comercial competitivo. Neste novo modelo do setor foram criadas a ANEEL, o Operador Nacional do Sistema (ONS) e os Procedimentos de Rede [1].

Neste cenário, a qualidade e a confiabilidade do setor elétrico precisavam atingir índices cada vez mais exigentes para os serviços de transmissão. E a qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, que já fazia parte do Contrato de Concessão de Transmissão e do Contrato de Prestação de Serviço de Transmissão, passou a ser medida com base na disponibilidade e na capacidade plena da função transmissão<sup>1</sup>.

Diante da nova realidade, as concessionárias de energia elétrica, principalmente com instalações “antigas”, integrantes da rede básica<sup>2</sup> do Sistema Interligado Nacional (SIN), se mobilizaram em busca de estratégias para garantir a confiabilidade do sistema, maximizar a disponibilidade e a capacidade plena das suas funções transmissão, através do diagnóstico do estado dos seus equipamentos.

A manutenção, conforme citado por SOUZA [2], até então considerada como fator de custos, baseada em pura troca de peças, com pouca técnica e improvisações de emergência, passou a ter elevada influência no processo produtivo da transmissão, pois influencia diretamente na disponibilidade da função transmissão e conseqüentemente na receita das empresas transmissoras de energia elétrica.

### 1.1.1 Remuneração dos ativos do setor elétrico

A concessão para prestação do serviço de transmissão de energia elétrica é dada ao agente que, durante o leilão realizado pela ANEEL, admitir receber a menor

---

<sup>1</sup> Função Transmissão (FT) - Conjunto de instalações dependentes entre si, de forma a tornar possível a prestação de serviço de transmissão, compreendendo o equipamento principal e os complementares.

<sup>2</sup> Rede Básica - Instalações de transmissão, que incluem linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação de tensão igual ou superior a 230 KV.

receita anual permitida (RAP) para o ativo em questão, tendo o dever de construí-lo, operá-lo e mantê-lo com os recursos advindos da RAP [3].

Pelos serviços prestados, independente do fluxo de energia que passa por suas instalações, o agente de transmissão recebe um pagamento base<sup>3</sup> que visa propiciar à transmissora a adequada remuneração para seus ativos e assegurar a recuperação dos custos de manutenção e operação.

Para garantir a qualidade dos serviços de transmissão e garantir a máxima disponibilidade dos ativos, em julho de 2007, a ANEEL emitiu a Resolução Normativa N° 270 (RN 270/2007), que estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da rede básica que compõem o SIN, penalizando quando houver indisponibilidade e restrição dos ativos.

Com a promulgação da RN 270/2007, conhecida como parcela variável (PV), todos os ativos da transmissão, licitados ou não, passaram a ter penalizações por indisponibilidade, medidas e aplicadas com base na disponibilidade e na capacidade plena das funções transmissão. O texto da RN 270/2007 define três tipos de PV:

- Parcela Variável por Atraso na Entrada em Operação;
- Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI);
- Parcela Variável por Restrição Operativa (PVRO).

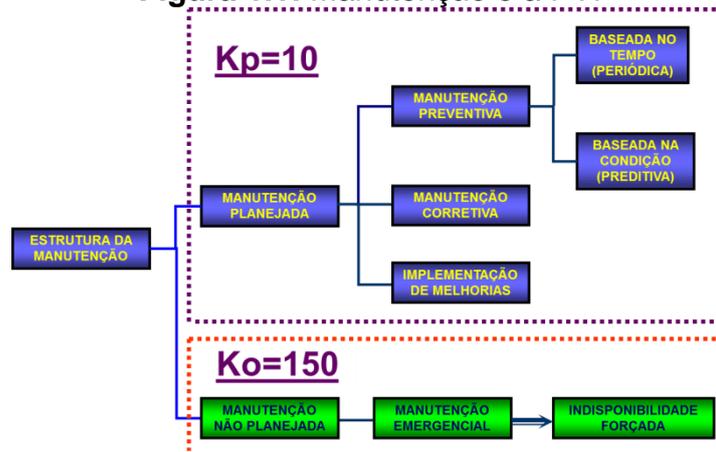
Assim, conforme apresentado na figura 1.1, manutenções que geram indisponibilidades programadas geram descontos de PVI de 10 vezes o valor da receita por hora da função transmissão, multiplicado pelo número de horas de indisponibilidade. E indisponibilidades provocadas por falhas de ativo geram descontos de PVI de 150 vezes o valor da receita por hora da função transmissão, também multiplicado pelo número de horas de indisponibilidade.

Em 18 de dezembro de 2012 a receita das concessionárias de energia foi afetada pela Medida Provisória 579, que criou as bases para a renovação dos contratos de concessão de usinas, distribuidoras e transmissoras, dando origem a uma série de mudanças na regulação do setor elétrico, que culminou com a publicação da lei 12.783, em 11 de janeiro de 2014.

---

<sup>3</sup> Pagamento Base – Corresponde a um duodécimo da RAP.

**Figura 1.1: Manutenção e a PVI**



Fonte: [3]

O texto da lei [4] estabelece que as concessões de energia elétrica poderão ser prorrogadas uma única vez, a critério do poder concedente, pelo prazo de até 30 anos. Desde que as concessionárias aceitem expressamente duas condições:

- Uma receita reduzida e fixada conforme critérios estabelecidos pela ANEEL;
- Submissão aos padrões de qualidade do serviço fixados pela ANEEL.

As empresas concessionárias de energia do país tiveram que novamente se adaptar a uma realidade onde houve uma redução de aproximadamente 70% na sua receita, mas os critérios de qualidade dos serviços continuaram a ser exigidos pela ANEEL.

Programas de manutenção eficientes que forneçam confiabilidade, qualidade e continuidade do serviço de transmissão passaram a ser essenciais para a sustentabilidade das empresas. E a adoção de políticas de substituição ou reforma de equipamentos, baseadas na real condição de desempenho dos mesmos, ao invés da avaliação de envelhecimento baseada meramente em suas idades cronológicas passaram a ser um fator importante, até porque os custos associados à aquisição, reparo e substituição desses equipamentos são muito elevados.

### 1.1.2 Gestão dos ativos do setor elétrico

Dois aspectos são extremamente importantes para as futuras considerações do gerenciamento de vida útil e risco operativo de reatores: o número de equipamentos com idade superior a faixa de 25 a 30 anos de operação está crescendo em todo setor elétrico brasileiro (SEB), devido ao grande investimento

realizado nos anos 60 e 70; e o carregamento dos reatores aumentou sensivelmente nas últimas duas décadas.

A necessidade por redução de custos, o envelhecimento crescente dos reatores e seu acentuado carregamento determinaram a necessidade do desenvolvimento de sistemas de diagnósticos especialistas com análises de tendências, avaliação das condições de desempenho e envelhecimento destes equipamentos. Nesse contexto é muito importante se diferenciar envelhecimento “normal” do “anormal”.

O envelhecimento dos reatores pode ser dividido em quatro processos fundamentais: Envelhecimento Dielétrico; Envelhecimento Térmico; Envelhecimento Químico e Envelhecimento Mecânico que com suas “assinaturas de defeito” estão fortemente interligados com a qualidade do projeto (dielétrico, térmico e dinâmico) e com as condições operativas (carregamento, transitórios de tensão e corrente, temperaturas ambientes, condições de curto-circuito, etc.).

Alguns autores consideram que o envelhecimento dos reatores é diretamente associado à deterioração do seu sistema isolante, composto por materiais sólidos (papel e papelão) e líquidos (óleo mineral isolante - OMI). Para eles a degradação do isolamento sólido é fator determinante na vida útil do equipamento, uma vez que, diferentemente do óleo, que pode ser tratado, regenerado ou substituído, a troca do isolamento sólido implica na desmontagem do reator e intervenção no enrolamento que compõe a parte ativa.

No entanto os reatores podem ser solicitados a operar sob diversas condições adversas, tais como: altas temperaturas, chuvas, poluição e sobrecarga. E por isso, mesmo que tenham uma operação e manutenção de qualidade, não se pode descartar a possibilidade de ocorrerem defeitos<sup>4</sup> ou falhas<sup>5</sup> que danifiquem o equipamento precocemente e deixem indisponíveis as funções transmissão às quais pertencem.

A investigação de defeitos, falhas e predição das condições operacionais em reatores é uma tarefa que exige uma avaliação criteriosa de informações acerca de suas condições operacionais e ensaios específicos para definir a causa raiz do problema ou, em casos onde não se dispõe de dados suficientes para tal, identificar

---

<sup>4</sup> Defeito – Refere-se à diminuição parcial da capacidade do equipamento em desempenhar a sua função durante um período de tempo, que se não for sanada pode evoluir para falha.

<sup>5</sup> Falha – Refere-se ao momento em que ocorre um evento súbito, cujo resultado é o desligamento do equipamento através da atuação das proteções automáticas da subestação.

as causas mais prováveis e excluir aquelas que não têm qualquer relação com o evento.

## 1.2 Motivações

De acordo com o abordado no item anterior, a disponibilidade dos ativos do sistema elétrico de potência é de extrema importância para a sustentabilidade das empresas concessionárias de energia, pois as penalizações com a PV podem reduzir drasticamente a receita destas empresas e até mesmo inviabilizar seu negócio.

Desta forma ao longo do ciclo de vida de um reator, é necessário tomar decisões sobre questões como:

- Que estratégia de manutenção adotar e quais os processos mais adequados?
- Qual o risco de operação para o reator em determinadas condições de exploração?
- Quais equipamentos são prioritários e/ou viáveis para ações de prolongamento de vida útil?
- Como determinar o melhor momento para substituição do reator (fim de vida útil)?

Levando em consideração que a população de reatores em serviço é extensa e dinâmica, é necessário definir prioridades de intervenções, através da hierarquização dos equipamentos por nível de risco para o sistema.

O advento de novas tecnologias possibilitou o aparecimento de técnicas de manutenção com procedimentos de avaliação e diagnóstico de sintomas que detectam e predizem defeitos e falhas nos reatores. Isto permitiu uma redução drástica nos tempos de interrupção, ou seja, indisponibilidade para inspeção e manutenção dos equipamentos.

No entanto a combinação de diversos procedimentos e novas tecnologias para diagnóstico e monitoramento do estado operacional do reator e sua classificação em relação ao seu ciclo de vida não é uma tarefa simples. Surge então a necessidade de buscar uma metodologia que possa agregar todos estes métodos de diagnósticos para uma boa avaliação do estado do reator e estimar sua posição atual em relação ao seu ciclo de vida.

Desta forma é possível identificar as unidades mais críticas, para as quais se devem orientar os esforços para aprofundar o diagnóstico do estado ou para aplicar medidas extraordinárias que visem o prolongamento de vida útil.

### **1.3 Objetivos**

Com base nas motivações apresentadas, foram definidos os seguintes objetivos para orientar o desenvolvimento desta dissertação:

- Caracterizar os reatores em derivação e seus principais componentes.
- Definir o ciclo de vida de reatores.
- Descrever os processos de manutenção e os tipos de ensaios para diagnóstico de reatores.
- Desenvolver a sistematização de uma metodologia de avaliação da condição, utilizando múltiplos agentes, para gestão do ciclo de vida de reatores.
- Estimar o estado de operação do reator e sua posição atual em relação ao seu ciclo de vida, através da execução de um conjunto de testes de diagnósticos (testes químicos, elétricos e avançados), denominados de múltiplos agentes.
- Com o auxílio dos diagnósticos obtidos com a combinação de cada um destes diferentes agentes, detectar falhas em estágios iniciais.
- Mapear os resultados em um modelo de condição sistematizado que oriente o ciclo de vida do reator para reduzir custos operacionais de manutenção, bem como aumentar a vida útil do equipamento por meio de intervenções programadas no mesmo.

### **1.4 Revisão bibliográfica**

A literatura de avaliação de vida útil de transformadores de potência, em diagnósticos, monitoramento e avaliação de estado está em constante crescimento [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Esta pode ser aplicada nos reatores por se tratarem de equipamentos muito semelhantes em sua construção.

Dentro dessa extensa literatura, destacam-se particularmente a [5], [9], [11], [13] e apresenta-se o estado da arte em diagnósticos retirados de [9] e [10].

Como muitos autores consideram que o envelhecimento dos reatores é diretamente associado à deterioração do seu sistema isolante, a maioria dos procedimentos de diagnósticos encontrados na literatura serve para detectar alterações no “sistema de isolamento”, devido a alterações dielétricas, térmicas ou mecânicas. Em geral, nenhuma dessas deficiências pode ser detectada num único procedimento de diagnóstico.

Na pesquisa de degradação e envelhecimento, a velocidade de alteração de estado do reator, com alterações progressivas dos parâmetros de avaliação são fundamentais. Neste contexto a literatura aponta os seguintes parâmetros como os mais importantes de mensurar:

- Perfil de descargas parciais;
- Temperaturas do enrolamento, óleo, ambiente e média de refrigeração;
- Análise dos gases dissolvidos;
- Teor de umidade e contaminação absorvida pela isolamento sólida;
- Análise dos derivados de furanos no óleo isolante;
- Determinação do grau de contaminação da isolamento sólida.

Em [16] e [18] são apresentados alguns dos procedimentos mais atuais, de laboratórios e de campo, de medições e diagnóstico. E o estado da arte e os diagnósticos predominantes para os tipos de faltas listados abaixo, são dados em [9] com alguns casos práticos apresentados em [9] e em [14]:

- Identificação de falta no dielétrico em circuitos magnéticos;
- Detecção de falta no dielétrico em enrolamentos e isolamento principal;
- Detecção de falta em buchas;
- Detecção de defeitos dinâmicos,
- Detecção de envelhecimento crítico de óleo e celulose devido problemas térmicos e dielétricos;

Os mais importantes métodos de diagnósticos de envelhecimento da isolamento (óleo e papel) pesquisados, devido a solicitações térmicas e dielétricas podem ser

sumarizados e agrupados em invasivos, não invasivos e monitoramento *on line* conforme segue:

### **Procedimentos não invasivos**

- Análise dos gases dissolvidos;
- Análises do óleo isolante (rigidez dielétrica, cor, acidez, índice de refração, tensão interfacial, fator de potência, partículas, etc.);
- Análises dos compostos de furanos;
- Determinação e quantificação de umidade em sólidos (como todos os processos de envelhecimento produzem moléculas de água, a detecção do teor de umidade na isolação sólida e também no óleo, se tornaram os principais alvos das pesquisas de envelhecimento);
- Índice da Resistência de Isolamento 15seg / 60 seg;
- Medições de Fator de Potência e Capacitância;
- Análises da Resposta Dielétrica:
  - Análise das Correntes de Polarização e Despolarização;
  - Análises PDC (domínio de tempo);
  - FDS (análise no domínio de frequência);
  - RVM (medição da tensão de retorno);

### **Procedimentos invasivos**

- Grau de polimerização (GP): a determinação do valor GP é um método de diagnóstico invasivo, que necessita da amostragem de um pedaço da isolação sólida interna, que tem as desvantagens da necessidade do desligamento do equipamento e da impossibilidade da coleta de amostras das regiões mais quentes do enrolamento;
- Karl Fischer volumétrico: até este momento, somente em laboratório é possível determinar o percentual de umidade por peso, com as mesmas desvantagens do item anterior;

### **Monitoramento *on line***

- Temperaturas (enrolamento, “hot spots”, ambiente e média de refrigeração);
- Ciclos de carregamento;

- Transitórios (tensão, corrente e potência);
- Descargas Parciais.

A pesquisa de envelhecimento nesses últimos 10 anos, [6], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25] e [26], tem se concentrado no desenvolvimento de diagnósticos de envelhecimento de transformadores, mas que também pode ser aplicada a reatores, utilizando novos métodos que estão baseados no desenvolvimento do antigo fenômeno de condução dielétrica da Análise de Resposta Dielétrica.

Entretanto, sabe-se que, em algumas situações, antes mesmo que o reator atinja seu final de vida útil pela degradação de sua isolação sólida, podem ocorrer defeitos e falhas graves que antecipam o final de vida útil deste equipamento. E neste caso, é importante agregar outros métodos de diagnósticos que detectem precocemente estes tipos de defeitos pra que se possa intervir no equipamento anteriormente à deflagração de uma falha.

Com tantos métodos de diagnósticos disponíveis torna-se extremamente complexo, conciliar e determinar a condição de degradação de um reator. Esta dissertação aborda justamente uma metodologia para sistematizar a análise combinada de alguns destes métodos de diagnósticos e estimar a posição atual em relação ao seu ciclo de vida de dez reatores instalados no Sistema de Transmissão do Pará da Eletrobras-Eletronorte.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos. Inicialmente no capítulo 1 é realizada uma breve revisão bibliográfica dos principais autores a respeito avaliação do ciclo de vida dos reatores.

O capítulo 2 apresenta a função dos reatores em derivação no sistema elétrico de potência, os tipos de reatores, seus aspectos construtivos com o detalhamento de cada um dos seus sistemas e componentes, além dos requisitos operacionais necessários aos reatores.

O capítulo 3 trata do ciclo de vida dos reatores e sua expectativa de vida, onde são apresentados os processos de envelhecimento do reator que ocorrem com a degradação de sua isolação sólida e líquida, além dos fatores agravantes para o

envelhecimento. Em seguida é apresentada uma definição para a vida útil restante de reatores e dois métodos de avaliação da umidade no papel isolante.

No capítulo 4 são descritos os principais tipos de manutenções aplicadas no setor elétrico, com os métodos de detecção de falhas em reatores através do uso de testes químicos, elétricos e avançados.

No capítulo 5 é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho para avaliação da condição de reatores e os critérios utilizados para sua classificação em relação ao ciclo de vida.

No capítulo 6 é apresentado um estudo de caso, com a avaliação de dez reatores de 500 kV alocados em duas subestações do sistema de transmissão do estado do Pará. Sendo detalhado o cálculo do índice da condição de dois destes reatores com sua classificação em relação ao ciclo de vida.

Por fim no capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

## 2 Reatores em Derivação

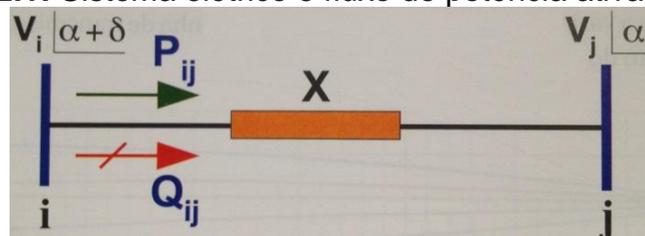
### 2.1 Função dos reatores em derivação no sistema elétrico

Em um sistema elétrico de potência, a transmissão eficiente de energia necessita do controle do nível de tensão no sistema, que varia de acordo com a geração e o consumo de energia do sistema. Esse controle é feito através do gerenciamento da potência reativa no sistema elétrico.

As linhas de transmissão são um guia de campos elétricos e magnéticos que geram ou absorvem energia reativa do sistema. Assim, quando a linha opera em vazio ou em carga leve, predomina o campo elétrico, e a linha se comporta como um capacitor, fornecendo energia reativa ao sistema. No entanto, em carga pesada, cuja situação extrema é a operação em curto-circuito, há predominância do campo magnético, e a linha absorve energia reativa do sistema.

Os parâmetros elétricos das linhas de transmissão (capacitância e indutância) são predeterminados em função do comprimento da linha e, por conseguinte são estabelecidos os fluxos de potências ativa e reativa, conforme ilustrado de forma simplificada na figura 2.1.

**Figura 2.1:** Sistema elétrico e fluxo de potência ativa e reativa



Fonte: [27]

A transferência de potência ativa e potência reativa entre as barras  $i$  e  $j$ , com tensões  $V_i$  e  $V_j$  defasadas do ângulo de fase  $\delta$ , pode ser representada pelas seguintes expressões.

Potência ativa  $P_{ij}$

$$P_{ij} = \frac{|V_i| \cdot |V_j|}{X} \cdot \text{sen} \delta \quad [MW] \quad (2.1)$$

Potência reativa  $Q_{ij}$

$$Q_{ij} = \frac{|V_j|}{X} \cdot (|V_i| \cdot \text{cos} \delta - |V_j|) \quad [MW] \quad (2.2)$$

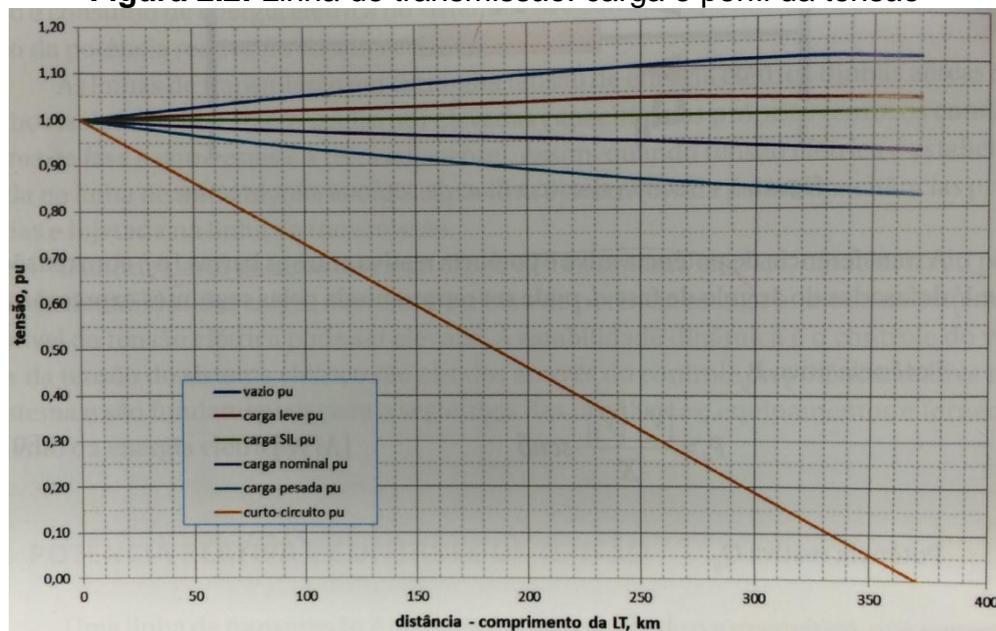
Das expressões (2.1) e (2.2) observa-se que a defasagem angular  $\delta$  altera fortemente o fluxo da potência ativa  $P_{ij}$  entre as barras e, o fluxo de potência reativa  $Q_{ij}$  causa uma forte alteração nos módulos das tensões nas barras.

Desta forma é possível alterar as características de transmissão da linha, atuando sobre seu circuito elétrico e assim regular os fluxos de potências ativas e reativas, regular as relações entre as tensões terminais, e neutralizar o efeito do excesso de reatância capacitiva, indutiva ou ambas.

No sistema elétrico os reatores em derivação, que podem ser de potência constante ou variável e cuja unidade é o VAR (Volt-Ampère reativo), têm a função de reduzir ou mesmo anular os efeitos capacitivos indesejáveis na operação das linhas, seja por carregamento leve (condição sistêmica) seja pelo comprimento longo das mesmas (condição física), além de melhorar o fluxo de potência entre as subestações, dando mais flexibilidade operacional para o sistema elétrico.

A figura 2.2 mostra a variação de tensão ao longo de uma linha de transmissão em função do comprimento e do carregamento da linha.

**Figura 2.2:** Linha de transmissão: carga e perfil da tensão

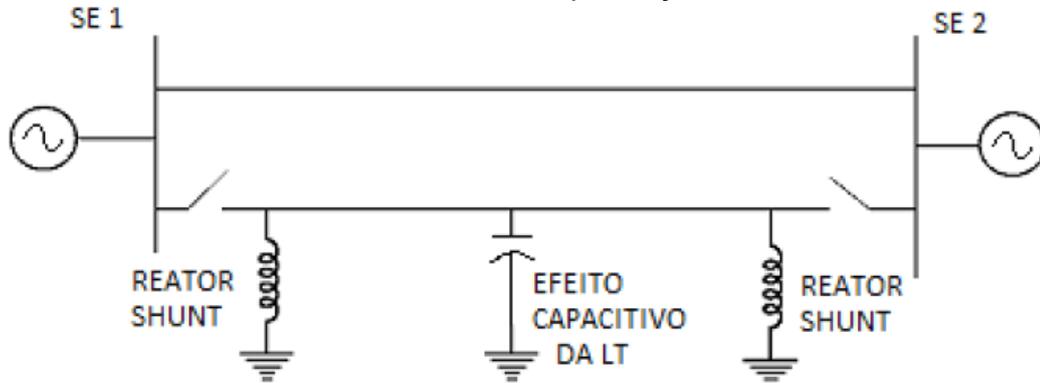


Fonte: [27]

O reator é um dos principais equipamentos utilizados para combater a elevação de tensão de operação da linha (efeito *ferranti*), através da absorção do excesso de potência reativa capacitiva do sistema, reduz e mantém o valor da tensão em níveis adequados de operação e de especificação dos demais equipamentos do SEP, além de reduzir as sobretensões nos surtos de manobra.

Vale ressaltar que, conforme mostra a figura 2.3, o emprego de reatores nas extremidades das linhas mantém, nestes pontos, as tensões em valores desejados, mas não elimina a elevação das tensões no meio da linha.

**Figura 2.3:** Linha de transmissão com compensação reativa através de reatores



Fonte: [28]

## 2.2 Requisitos operacionais

### 2.2.1 Tolerância do valor da reatância

A reatância nominal para a tensão e frequência nominal especificada ( $X_r$ ), em ohms por fase, é calculada a partir da potência e tensão nominal. Isto é:

$$X_r = \frac{U_r}{I_r} = \frac{U_r^2}{Q_r} \quad [\Omega/\text{fase}] \quad (2.3)$$

E a indutância correspondente ( $L_r$ ) resulta:

$$L_r = \frac{X_r}{2\pi f_r} = \frac{U_r^2}{2\pi f_r \cdot Q_r} \quad [H/\text{fase}] \quad (2.4)$$

Onde:

$U_r$  [kVrms] é a tensão nominal especificada;

$I_r$  [Arms] é a corrente nominal;

$Q_r$  [kVAr] é a potência reativa nominal especificada;

$f_r$  [Hz] é a frequência nominal especificada.

Considerando a característica linear da relação ( $U \times I$ ), a reatância ( $X_r$ ) e a indutância ( $L_r$ ) têm valor constante mesmo para a tensão operativa máxima ( $U_{max}$ ) maior que a tensão nominal ( $U_r$ ).

Admite-se uma tolerância de  $\pm 2\%$  por fase em relação ao especificado em projeto para a reatância, sendo que nenhum valor medido de qualquer das três fases pode se afastar mais do que 1% do valor medido nas três fases.

### 2.2.2 Regime de operação

Os reatores, especificados para operar continuamente na máxima tensão operativa da rede durante toda a sua vida útil, operam em interação contínua com o sistema elétrico aos qual estão conectados, desta forma seu estado de operação pode ser caracterizado como: em regime permanente com tensão nominal; em regime temporário com tensão máxima operativa; e em regime transitório.

Quando em regime permanente, existe uma relação direta entre a tensão aplicada e a corrente do reator. Com uma tensão de forma de onda senoidal, o fluxo e a indução magnética também são proporcionais à tensão e a reatância indutiva é constante.

Em regime transitório os reatores estão sujeitos a dois fenômenos: corrente de ligação (*inrush*), que ocorre na manobra de energização e está associada a efeitos de saturação no núcleo magnético; e sobretensões transitórias que podem ser agrupadas em temporárias e/ou a frequência industrial, transitórias de manobra e transitórias de impulsos atmosféricos.

Desta forma os reatores manobráveis devem ser especificados para suportar os transitórios, devido às manobras de abertura e fechamento diárias de seus disjuntores durante toda a sua vida útil.

As manobras de abertura e fechamento de reatores não devem provocar sobretensões inadmissíveis ou transitórios de frequência elevada que possam colocar em risco os demais equipamentos da subestação, nem o próprio reator manobrado. Além disso, sua manobra não deve provocar reignição ou reacendimento dos arcos nos disjuntores.

O máximo aproveitamento de um reator se dá através de aplicações de cargas ao equipamento, de forma a não comprometer a sua vida útil. Os valores das cargas máximas admissíveis dependem de vários fatores, incluindo as características de projeto, construção e operação, a curva diária de carregamento, o histórico de carregamento, o programa de manutenção, a temperatura ambiente, o período de carregamento acima da potência nominal, as perdas envolvidas, etc.

### 2.3 Tipos de reatores

Os reatores em derivação da Eletrobras-Eletronorte, sobre os quais se enquadra o presente trabalho, são do tipo monofásicos, imerso em óleo, de núcleo magnético, com tensão nominal de 525 kV e potência reativa de 60 MVar e 50 MVar. A família de reatores avaliada é de fabricação Jeumont Schneider (1980 e 1987), sendo três unidades monofásicas instaladas na SE Vila do Conde e sete unidades instaladas na SE Marabá. A figura 2.4 mostra a vista geral de reatores instalados nas subestações de Vila do Conde e Marabá.

**Figura 2.4:** Reatores em derivação 525 kV – 60 MVar e 50 MVar



Fonte: Arquivo pessoal

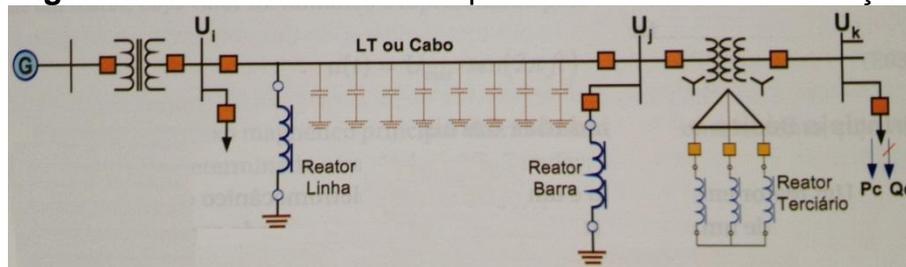
#### 2.3.1 Tipos de ligação

Quanto à forma de conexão ao sistema elétrico, o reator em derivação pode ser não manobrável (ligação fixa e permanente ao sistema elétrico) ou manobrável (ligação temporária ao sistema elétrico e manobrável através de disjuntor).

#### 2.3.2 Tipos de localização

De acordo com a localização do reator em derivação este pode ser classificado como de linha, de barra ou terciário. A figura 2.5 mostra um diagrama simplificado de um sistema de potência, com um reator de derivação conectado à linha de transmissão, à barra de subestação e ao terciário de um transformador.

**Figura 2.5:** Sistema elétrico de potência e reator em derivação



Fonte: [27]

### 2.3.3 Tipos de núcleo

O reator em derivação pode ter núcleo de ar ou magnético. Em geral, os reatores com núcleo de ar apresentam grandes dimensões quando comparados a reatores com núcleo magnético. Os reatores com núcleo de ar são amplamente utilizados quando conectados ao enrolamento terciário de autotransformadores.

No Brasil, a maioria dos reatores em derivação utilizados no sistema elétrico é do tipo núcleo magnético, onde a coluna principal do núcleo é constituída de segmentos de material ferromagnético com entreferros (*gaps* de ar). Este núcleo denominado de núcleo com entreferros resulta em reatores mais compactos, econômicos e com perdas reduzidas.

### 2.3.4 Tipos de construção

Quanto à construção os reatores em derivação podem ser monofásicos ou trifásicos, a escolha entre eles depende de análises técnicas e econômicas, que levam em consideração:

- A aplicação prevista.
- O custo do investimento, montagem e manutenção.
- Confiabilidade e a necessidade de unidade reserva.
- Limitação de transporte por questões dimensionais ou por localizações de difícil acesso.
- Limitação de capacidade de fabricação ou ensaios de fábrica.
- Limitação de espaço para instalação.

## 2.4 Aspectos construtivos dos reatores

De forma prática, um reator para cumprir sua função necessita de uma serie de acessórios e componentes que possibilitem sua operação sob condições

controladas de temperatura, estanqueidade e dentro de parâmetros especificados em projeto. Para se ter uma visão geral e simplificada de um reator, a figura 2.6 mostra os seus componentes principais.

**Figura 2.6:** Principais componentes do reator em derivação



1-Núcleo	4-Tanque de expansão	7-Painel de controle
2-Enrolamentos	5-Buchas	8-Secador de ar
3-Tanque principal	6-radiadores	9-Termômetros

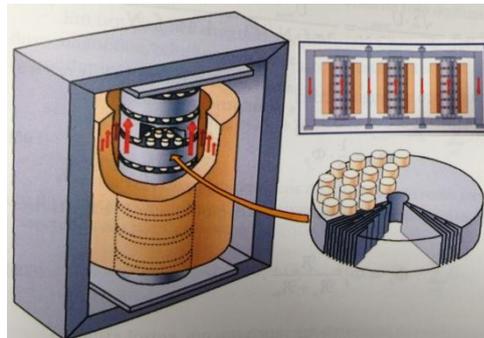
Fonte: [28]

Pode-se segmentar um reator em: parte ativa, sistemas de preservação de líquido isolante, sistema de isolamento, sistema de refrigeração e acessórios.

#### 2.4.1 Parte ativa

A parte ativa do reator, onde é realizado o fenômeno de indução eletromagnética, é composta pelo núcleo (de ar ou magnético) e um enrolamento, conforme mostra a figura 2.7.

**Figura 2.7:** Parte ativa do reator em derivação



Fonte: [27]

Seu funcionamento está fundamentado nas Leis de Ampère (a corrente elétrica em um circuito estabelece um campo magnético) e de Faraday (um circuito imerso em um campo magnético variável é submetido a uma tensão elétrica). Assim, o fluxo magnético principal no núcleo,  $\varnothing(t)$ , é determinado essencialmente pela tensão de fase aplicada entre os terminais do enrolamento e pode ser representado pela expressão (2.5).

$$\varnothing(t) = -\frac{U_{max}}{2\pi f N} \cdot \cos(2\pi f t) \quad [Tm^2] \quad (2.5)$$

$$\varnothing(t) = -\Phi_P \cdot \cos(2\pi f t) \quad [Wb] \quad (2.6)$$

Onde:

$N$  é o número de espiras;

$\Phi_P$  é o valor de pico de  $\varnothing(t)$ .

De outra forma, em um reator monofásico, o circuito magnético pode ser descrito pela Lei de Hopkinson, que determina o fluxo magnético principal no núcleo em função da força magnetomotriz estabelecida pela corrente  $I$  no enrolamento de  $N$  espiras, isto é:

$$N \cdot I_{max} = \mathfrak{R} \cdot \Phi_P = \frac{1}{G} \cdot \Phi_P \quad [A] \quad (2.7)$$

Onde:

$G$  é a permeância magnética;

$I_{max}$  é o valor de pico da corrente elétrica  $i(t)$  estabelecida no enrolamento quando a tensão instantânea  $u(t)$  é aplicada aos seus terminais.

$\mathfrak{R}$  é a relutância magnética:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} \quad [A/V.s] \quad (2.8)$$

$\mu_r$  [pu] é a permeabilidade relativa do material da rota do fluxo magnético.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [V.s/A.m ou H/m] é a permeabilidade magnética do vácuo.

$l$  [m] é o comprimento da rota do fluxo magnético.

$A$  [m<sup>2</sup>] é a área da secção transversal da rota do fluxo magnético.

A relação entre as variações instantâneas do fluxo magnético produzido pela corrente de circulação no mesmo enrolamento de  $N$  espiras determina a indutância elétrica própria  $L$  do enrolamento.

$$L = N \cdot \frac{d\phi(t)}{dI(t)} = N \cdot \frac{\Phi_P}{I_{max}} \quad [\text{L ou V.s/A}] \quad (2.9)$$

Adicionalmente da expressão (2.7)

$$\Phi_P = \frac{N \cdot I_{max}}{\mathfrak{R}} \quad [\text{V.s}] \quad (2.10)$$

Assim da expressão (2.9) a indutância pode ser escrita como:

$$L = N \cdot \frac{\Phi_P}{I_{max}} = N \cdot \frac{N \cdot I_{max}}{\mathfrak{R} \cdot I_{max}} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = N^2 \cdot G \quad [\text{L ou V.s/A}] \quad (2.11)$$

Ou seja, a indutância  $L$  pode ser facilmente calculada se a relutância magnética  $\mathfrak{R}$  ou a permeância magnética  $G$  for conhecida.

#### 2.4.1.1 Núcleo

O núcleo é a parte do reator onde circulam os fluxos magnéticos no circuito magnético. Na construção do circuito magnético são utilizados materiais que garantam a limitação do valor das perdas no ferro e da corrente de excitação, garantindo a conservação integral das qualidades magnéticas ao longo do tempo. Devem por isso ter uma permeabilidade magnética muito elevada, para permitir atingir a indução de trabalho com a corrente de excitação mais baixa possível, e uma indução de saturação suficientemente alta que permita fluxos elevados sem agravar a secção e volume de ferro.

A maioria dos equipamentos fabricados tem seu núcleo formado por chapas de aço silício de cristais orientados, laminados a frio, possuindo como características principais alta permeabilidade e baixas perdas específicas.

Cada lâmina é recoberta por uma película isolante resistente ao calor e não afetada pelo óleo isolante usado nos reatores. Após o corte contínuo longitudinal, as lâminas são cortadas transversalmente no comprimento exigido pelo projeto, em ângulo de 90°. Ao serem empilhadas as lâminas das colunas de retorno e dos jugos são unidas no topo, ficando uma sobreposição entre as várias camadas. Tal sistema, além de dar excelente resistência mecânica ao conjunto, proporciona o melhor

aproveitamento das características magnéticas das lâminas, no que se refere a perdas, corrente de excitação e ruído.

Paralelamente às considerações de caráter magnético, o núcleo é projetado para ser eficientemente resfriado por canais de circulação do óleo, que após o empilhamento é prensado por armaduras de aço inox em correspondência aos jugos e aço carbono nas colunas de retorno.

Para evitar a formação de cargas eletrostáticas induzidas, as armaduras e o núcleo são firmemente aterrados no tanque em um único ponto, por meio de conexão aparafusada de forma que possa ser aberta por ocasião de controles ou da retirada do tanque. Após a introdução da parte ativa no tanque, o posicionamento do núcleo é assegurado por meio de pinos de guia e suportes evitando deformações do conjunto ou deslizamentos por solicitações causadas pelo transporte.

#### **2.4.1.2 Enrolamentos**

As perdas do reator dependem da resistência do enrolamento, por isso devem ser utilizados materiais de elevada condutividade. O cobre é geralmente o material mais utilizado na fabricação dos enrolamentos, pois agrupa as propriedades mecânicas adequadas e a mais elevada condutividade dentre os metais disponíveis no mercado a preços interessantes.

Para fabricação dos enrolamentos utiliza-se tipicamente cobre eletrolítico recozido de alta condutividade com 99,9% de pureza ou ligas de cobre (com cerca de 99,9% Cu na sua composição), sob a forma de barras isoladas tipicamente com papel *kraft*.

Com relação ao tipo de enrolamento utilizado, um reator de derivação pode ter os seguintes tipos de enrolamentos, dependendo do nível de tensão:

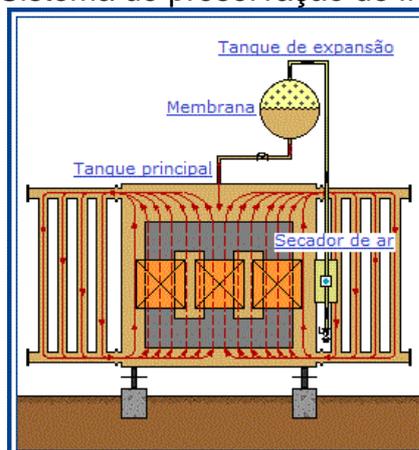
- Disco contínuo: tipicamente utilizado em altas tensões até aproximadamente 92 kV.
- Disco em camadas (*disk layer*): utilizados em altas tensões até 245 kV.
- Disco contínuo com blindagens internas (*shielded disk*): utilizados em altas tensões até 345 kV.
- Camada: utilizados em extra-alta tensão. Neste tipo de enrolamento as camadas concêntricas são ligadas em série com isolamento interna entre espiras e camadas.

- Disco entrelaçado: utilizados em extra-alta e ultra-alta tensões. Este tipo de enrolamento caracteriza-se por sua elevada capacitância série, resultando numa distribuição aproximadamente linear das tensões do tipo impulso de alta frequência.
- Disco parcialmente entrelaçado: utilizados em extra-alta e ultra-alta tensões. Este tipo de enrolamento é uma combinação do enrolamento do tipo disco entrelaçado e de disco contínuo.

#### 2.4.2 Sistema de preservação de líquido isolante

O sistema de preservação do líquido isolante é composto pelo tanque principal, tanque de expansão do óleo, membrana ou bolsa de borracha e secador de ar, conforme mostra a figura 2.8.

**Figura 2.8:** Sistema de preservação de líquido isolante



Fonte: [28]

A principal função deste sistema é manter sob controle os menores níveis possíveis de umidade e oxigênio interno ao mesmo, evitando assim a oxidação da isolação.

##### 2.4.2.1 Tanque principal

O tanque assegura o suporte e proteção mecânica dos diversos componentes do reator. É também o tanque que assegura a ligação à terra do circuito magnético e das várias partes metálicas do reator. Os tanques são normalmente fabricados em chapa de aço, de construção soldada, obedecendo a um cuidadoso projeto que prevê a distribuição interior de massas e os reforços necessários em cada ponto crítico.

Algumas características a assegurar no processo de fabricação do tanque e seus componentes são a estanqueidade, resistência à corrosão, resistência estrutural e resistência ao vácuo. Estas características são fundamentais para garantir um bom desempenho na sua vida útil e minimizar as necessidades de manutenção, uma vez que além de permitir as fugas de óleo, a falta de estanqueidade pode originar o ingresso de umidade da atmosfera para o interior do reator.

#### **2.4.2.2 Tanque de expansão**

O tanque de expansão ou conservador é o depósito de óleo superior, com ligação ao tanque principal do reator, que permite compensar as dilatações ou contrações do volume do óleo em função das variações de temperatura.

Considerando que, sob a ação da temperatura, o volume de óleo varia 0,075% por grau Celsius e tendo em conta as variações extremas de temperatura, deve dar-se ao conservador um volume aproximado de 10% do volume total de óleo, assim é possível manter o nível de óleo acima da tampa em qualquer circunstância.

Para evitar qualquer acidente grave, os conservadores são dotados ainda de um indicador de nível de óleo, que pode ser equipado com contatos que acionam alarmes no caso de o nível do óleo descer ou subir exageradamente.

A variação do volume de óleo no conservador com a temperatura é compensada com a entrada e saída de ar do conservador, por um tubo ligado ao exterior através de um secador de ar para absorção da umidade presente nessa massa de ar. Esse ar poderá ou não ficar em contato com a superfície de óleo isolante no conservador, dependendo do tipo de conservador aplicado:

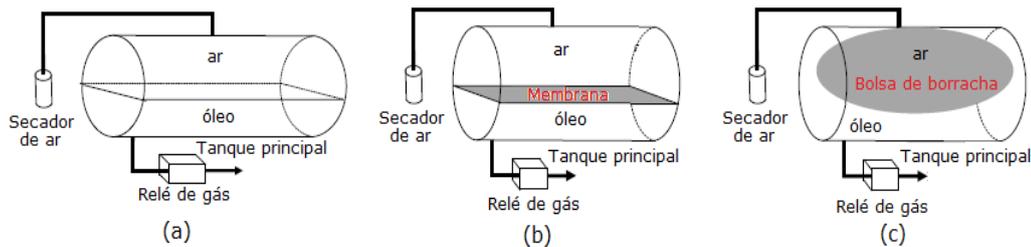
- Conservador normal – o óleo fica em contato com o ar;
- Conservador equipado com bolsa de borracha ou membrana – o ar não entra em contato com o óleo isolante, sendo o volume de compensação preenchido por membrana ou bolsa de borracha tipo “balão” estanque.

#### **2.4.2.3 Bolsa de borracha ou membrana**

A bolsa de borracha ou membrana utilizada nos conservadores de óleo dos reatores é um acessório opcional e tem como objetivo evitar o contato do líquido isolante com a atmosfera, preservando-o da umidade e oxidação.

A figura 2.9 mostra as várias configurações do interior de um tanque de expansão, sendo na figura 2.9 (a) um tanque sem nenhum acessório, e o óleo fica em contato direto com o ar (menos usual); na figura 2.9 (b) um tanque que utiliza uma membrana em seu interior; e na figura 2.9 (c) um tanque que usa uma bolsa de borracha para fazer a selagem entre o ar e o óleo.

**Figura 2.9:** Tanque de expansão (a) sem acessório (b) com membrana (c) com bolsa de borracha



Fonte: [28]

O ar proveniente da atmosfera e utilizado no interior do tanque, nas figuras 2.9 (a) e (b), e no interior da bolsa, na figura 2.9 (c) para compensação das variações de volume do líquido isolante, passa por um secador de ar que o mantém seco.

#### 2.4.2.4 Secador de ar

A fim de que sejam mantidos elevados os índices dielétricos do líquido isolante dos reatores, secadores de ar ou desumidificadores são utilizados devido à capacidade de absorção de umidade, pois secam o ar aspirado que flui para o reator.

O secador de ar é composto de um recipiente metálico, no qual está contido o agente secador e uma câmara para óleo, colocada diante do recipiente que contém o agente secador, isolando-o na atmosfera, conforme mostra a figura 2.10.

**Figura 2.10:** Secador de ar



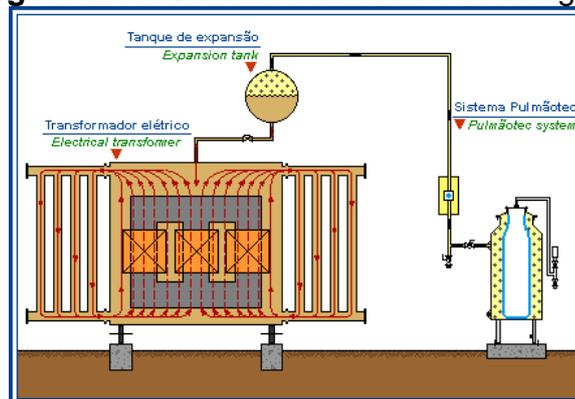
Fonte: [28]

Durante o funcionamento normal do reator, o óleo aquece e dilata, expulsando o ar do conservador através do secador. Havendo diminuição da carga do reator ou da temperatura ambiente, também haverá diminuição da temperatura do óleo, acompanhada da respectiva redução do volume. Forma-se, então, uma depressão de ar no conservador e o ar ambiente é aspirado através da câmara e do agente secador, o qual absorve a umidade contida no ar, que entrará em contato com o óleo.

O agente secador, denominado sílica-gel, é vítreo e duro, quimicamente quase neutro e altamente higroscópico. É um silício (95%  $\text{SiO}_2$ ), impregnado com um indicador que pode ser laranja ou azul (5%), quando em estado ativo, mas que devido a absorção de água, torna-se amarelo claro ou róseo, devendo, então, ser substituído. A sílica-gel pode ter sua vida prolongada através de processo de secagem em estufa na temperatura de  $80^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$ , que pode ser aplicado algumas vezes, e assim poder ser reutilizado.

Existe ainda um sistema de selagem, utilizado nos reatores foco deste trabalho, que conecta o tanque de expansão com uma espécie de pulmão eliminando o uso de acessórios no interior do tanque e do secador de ar, conforme mostra a figura 2.11. Desta forma quando o volume de óleo do reator aumenta, a massa de gases do tanque de expansão é transferida para o “tanque-pulmão” e o ar contido no interior da bolsa do tanque-pulmão é expulso, livre de contaminação, para o meio ambiente.

**Figura 2.11:** Sistema Pulmãotec de selagem



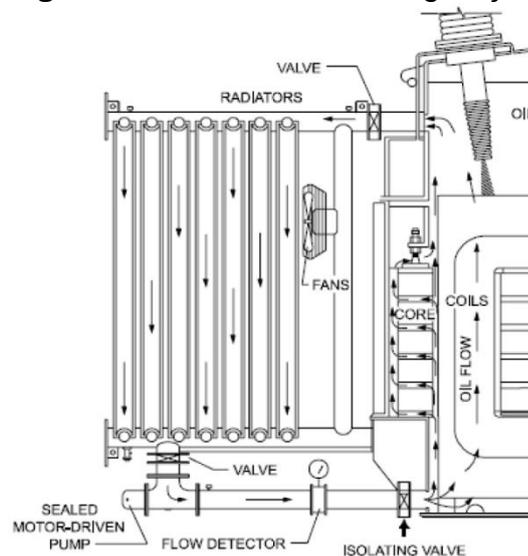
Fonte: [28]

#### 2.4.3 Sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração do reator é realizado tipicamente através da circulação de óleo isolante pelos radiadores, com o uso ou não de bombas de

circulação, que é resfriado de forma natural ou através de ventiladores, conforme mostra a figura 2.12.

**Figura 2.12:** Sistema de refrigeração



Fonte: [28]

#### 2.4.3.1 Radiadores

Os radiadores ou trocadores de calor, instalados na parte externa do tanque, fazem a circulação do óleo isolante através de aletas que, em contato com o ar ambiente, diminuem a temperatura do óleo.

A circulação pode ser do tipo natural (ONAN – óleo natural, ar natural), com ar forçado através de moto-ventiladores nos radiadores (ONAF – óleo natural, ar forçado), com moto-bombas para aumentar o fluxo de óleo (OFAF – óleo forçado, ar forçado), com sistema de óleo dirigido nas bobinas (ODAF – óleo dirigido, ar forçado) ou mesmo com trocadores de calor que utilizam água como meio refrigerante ao invés do ar ambiente (OFWF – óleo forçado, água forçada).

A energia térmica gerada pelas perdas (no núcleo, enrolamento e nas estruturas metálicas) é transferida para o óleo isolante e em seguida para as superfícies do tanque e do sistema de resfriamento para o ambiente externo.

Os modos de transferência de calor podem ser por **condução** (transferência de calor através da isolação e aço para as superfícies e dutos de resfriamento), **convecção natural ou forçada** (extração do calor pelo movimento do óleo) ou **radiação** (transferência de calor da superfície externa do tanque e/ou sistema de resfriamento para a atmosfera).

### **2.4.3.2 Bombas de circulação de óleo**

As bombas de circulação do óleo isolante contido no reator propiciam o aumento da eficiência de troca de calor no equipamento. Os materiais utilizados para a construção da bomba devem ser similares aos utilizados no reator. Cuidados especiais são considerados na lubrificação do equipamento, que deve ser feita por materiais que não agridam ou contaminem os materiais isolantes do reator. Para a condição de operação da bomba de óleo, a temperatura máxima permissível para o óleo que circule na bomba não deve ultrapassar a temperatura limite do óleo isolante.

As bombas são construídas de forma a minimizar a perda de carga quando não estão em funcionamento, para possibilitar a passagem do óleo isolante na condição de convecção natural e também impedir que haja contato entre as partes rotativas e fixas do conjunto, evitando o desprendimento de materiais metálicos que possam comprometer o funcionamento do reator.

A instalação da bomba é feita na tubulação da entrada ou saída dos conjuntos de radiadores ou trocadores de calor.

### **2.4.3.3 Ventiladores**

Os ventiladores utilizados em reatores são do tipo axial, uma vez que os radiadores oferecem baixa resistência à passagem do ar.

São compostos de uma hélice acoplada diretamente ao eixo de um motor, montados em uma estrutura cilíndrica que também servirá para sua fixação aos radiadores, juntamente com grades de proteção na entrada e saída do ar.

Quanto a sua instalação podem ser fixados nas laterais dos radiadores, com fluxo de ar na horizontal, ou sob os mesmos, com fluxo de ar na vertical. Nesse caso, é conveniente que os radiadores estejam a uma distância do solo suficiente para que os ventiladores não aspirem materiais que possam comprometer o funcionamento e a vida útil dos equipamentos.

Alguns aspectos construtivos dos ventiladores são descritos a seguir:

- As hélices podem ser fabricadas em alumínio, em plástico, aço carbono ou ainda com a combinação desses materiais;
- A estrutura de fixação de seus componentes pode ser de aço carbono ou aço inoxidável, bem como as grades de proteção;

- Para casos onde os ventiladores operam em ambientes expostos a intempéries, é necessária a aplicação de proteção específica, como por exemplo, galvanização a fogo para estruturas e grades metálicas ou adição de materiais resistentes aos raios solares para os plásticos.

#### 2.4.4 Acessórios

O reator possui diversos acessórios que de forma resumida pode-se citar: as buchas que são responsáveis pela interligação e isolamento entre os enrolamentos e o sistema elétrico em que o equipamento está interligado; Indicadores locais ou remotos de grandezas monitoráveis como, por exemplo, temperatura e nível de óleo, proteções intrínsecas que atuam para o desligamento da unidade quando ocorrem falhas internas. Por exemplo, o rele de gás (*buchholz*) que atua quando da formação de gases internos, o dispositivo de alívio de pressão que atua quando há uma diferença de pressão abrupta no interior do tanque principal, o indicador de fluxo que indica a vazão nos circuitos de resfriamento ou ainda sistemas mais complexos de monitoramento que supervisionam grandezas elétricas importantes para diagnósticos incipientes no processo de falha de um equipamento como fator de dissipação da isolação, ponto quente de enrolamento ou formação de gases.

##### 2.4.4.1 Buchas

As buchas fazem parte do sistema de conexão entre o reator e o sistema elétrico em que o equipamento está conectado. Têm fundamental importância, pois falhas neste componente geralmente têm como consequências, incêndio e explosão, que comprometem completamente a integridade do reator.

As buchas são componentes utilizados para conduzir tensão e corrente através de uma superfície aterrada, como o tanque do reator. Em resumo as buchas devem ser capazes de conduzir a corrente do reator, em condição de regime normal e de sobrecarga e manter a isolação, tanto para tensão nominal quanto para as sobretensões, resistindo aos esforços mecânicos.

Em reatores, as buchas aplicadas são normalmente óleo-ar, onde uma extremidade fica imersa em meio controlado, o óleo isolante, e a outra extremidade, que fica ao ar livre, possui isoladores de porcelana ou polimérico, podendo ser instaladas em locais de diferentes tipos de condições climáticas ou com altos índices de poluição e salinidade.

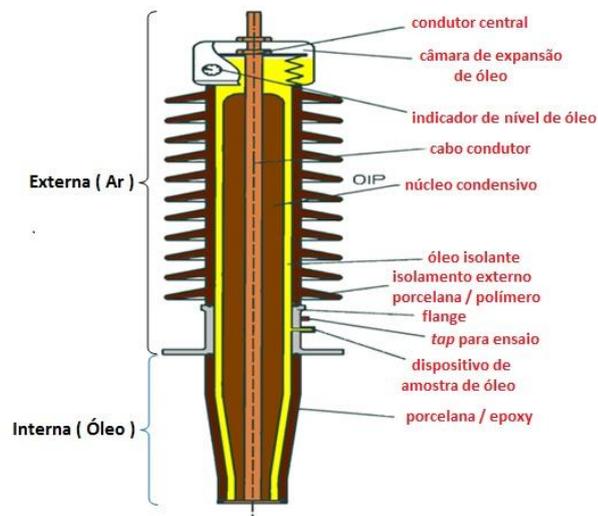
No sistema elétrico da Eletrobras-Eletronorte existem basicamente dois tipos de bucha: buchas sólidas (*Bulk Bushing*), utilizadas em sistemas de até 52 kV, e buchas capacitivas (*condenser bushing*), utilizadas em sistemas acima de 52 kV.

Segundo [27] tem-se atualmente nove tecnologias aplicadas em bucha, sendo oito muito conhecidas e consagradas, e uma recém desenvolvida (RIS):

- Bucha sólida ou seca (*bulk bushing*);
- Bucha sólida de isolamento combinada (Resina Epóxi e Silicone);
- Bucha de papel aglutinado com resina (RBP);
- Bucha de papel impregnado com óleo (OIP);
- Bucha de papel impregnado com resina (RIP);
- Bucha isolada a gás (SF6);
- Bucha de isolamento combinada (OIP e SF6);
- Bucha de isolamento combinada (RIP e SF6);
- Bucha de fibra sintética impregnada com resina (RIS);

As buchas aplicadas nos reatores, objetos deste trabalho, são todas de tecnologia OIP, conforme mostrado na figura 2.13. Estas desde que foram criadas, em 1930, tiveram rápido crescimento no mercado, uma vez que a tecnologia RBP apresentava alguns problemas na fabricação. Na tecnologia OIP a isolamento do corpo capacitivo é formada basicamente de papel *kraft* impregnado de óleo isolante. O processo fabril que envolve a retirada de umidade do papel, vácuo e impregnação com óleo isolante, após a montagem, garante um alto grau de isolamento com baixo nível de tangente delta e descargas parciais.

**Figura 2.13:** Principais componentes de uma bucha OIP



Fonte: [29]

Acoplados em volta da parte inferior da bucha e abaixo do flange, no interior do tanque do reator, estão os transformadores de corrente (TCs de bucha), que são dispositivos tipo toroidais, instalados para obter a corrente secundária com valores proporcionais às do circuito primário, necessária para a operação dos sistemas de medição instantânea, proteção e controle do equipamento. Os TCs de bucha utilizados em reatores apresentam características como relação de espiras, classes de exatidão e capacidade de corrente, de acordo com a sua aplicação.

#### 2.4.4.2 Termômetros

São usados fundamentalmente para indicar a temperatura dos enrolamentos, do óleo isolante e a medição indireta do ponto mais quente do enrolamento (imagem térmica) do reator.

Os indicadores de temperatura, eletromecânicos ou eletrônicos, conforme mostram as figuras 2.14 (a) e (b) respectivamente, podem ser ajustados ou programados para acionamento da refrigeração, supervisão da temperatura, monitoramento *on-line* contínuo, alarme ou desligamento (*trip*), dependendo da filosofia adotada pela empresa proprietária do ativo.

**Figura 2.14:** Termômetro (a) eletromecânico, (b) eletrônico



Fonte: [29]

O indicador eletromecânico de temperatura do óleo é construído em caixa robusta e impermeável (IP54), com visor de vidro e ponteiros ligados a contatos. O mecanismo (Espiral de *Bourdon* ou Fole) é acoplado a ponteiros, sendo um de arraste (ponteiro vermelho) que indica a temperatura máxima alcançada pelo óleo e o outro que indica a temperatura instantânea do óleo (ponteiro branco). Os contatos auxiliares são acionados quando o óleo alcança valores definidos de temperatura.

O indicador eletromecânico de temperatura do enrolamento (Imagem térmica) apresenta característica construtiva similar ao do óleo, acrescido de componentes utilizados para simular a temperatura do enrolamento (resistência e TC de bucha).

Os indicadores eletrônicos de temperatura são constituídos de PT100 (RTD) instalado no topo do reator, com medição de corrente a partir de TCs de bucha e um indicador micro-processado (IHM). O processamento das informações obtidas a partir do PT100 e TCs fornece tanto a temperatura do óleo do reator quanto à temperatura do ponto mais quente do enrolamento do reator (imagem térmica). O valor da temperatura do enrolamento é obtido através de algoritmos processados no indicador eletrônico.

Os indicadores eletrônicos de temperatura podem estar preparados para receberem mais de uma entrada de temperatura a partir de PT100 e mais de uma medição de corrente. A medição de corrente pode ser obtida diretamente dos TCs de bucha do reator ou a partir de TCs auxiliares instalados no circuito secundário dos TCs de bucha. Geralmente, possuem contatos auxiliares de saída, além de saídas analógicas que possibilitam a leitura dos valores de temperatura por sistemas supervisórios ou de monitoramento *on-line* contínuo.

Existem também, conectadas a um indicador eletrônico, as sondas de temperatura de fibra ótica, que podem ser encaixadas diretamente no enrolamento enquanto o reator está sendo fabricado e possibilitam a medição direta do ponto mais quente do reator, de acordo com o projeto do equipamento. Sondagens de temperatura de fibra ótica podem ser usadas para validar o projeto térmico do reator durante o ensaio de aquecimento e sobrecarga.

#### **2.4.4.3 Válvulas**

As válvulas desempenham um papel fundamental para as ações de manutenção, sendo os pontos de acesso não intrusivo ao reator. Permitem a interface com sistemas de enchimento/esvaziamento, circulação, tratamento e amostragem de óleo isolante, e aplicação de sistemas de vácuo no reator.

Têm também a função de isolamento de certos componentes tais como os radiadores, bombas de circulação, conservador e relés, o que permite realizar operações de manutenção minimizando o manuseio de óleo do reator.

#### 2.4.4.4 Vedações

As vedações são elementos essenciais para a preservação da estanqueidade do reator em todas as aberturas, de acesso de pessoas ou conexão de componentes, evitando contato do interior do equipamento com umidade e oxigênio. As juntas utilizadas devem ser de materiais e aditivos compatíveis com o regime de temperaturas previsto e o fluido a ser vedado, neste caso óleo mineral isolante, devendo estar isentos de compostos de enxofre solúveis em óleo.

São utilizados normalmente dois tipos de vedações em reatores, as juntas planas e as toroidais (*o-rings*), onde sua montagem deve ser realizada com uma compressão de até 25% (superfícies usinadas e rugosas) para juntas planas e até 33% (superfícies usinadas) ou até 55% (superfícies rugosas) para vedações toroidais [28]. Os materiais utilizados na produção de vedação são basicamente:

##### *Elastômero:*

- Borracha de Policloropreno (CR) - Possui baixa compatibilidade com o óleo naftênico, é utilizada em temperatura de operação entre -30°C a 120°C. Encontrada em equipamentos antigos e em desuso em projetos novos;
- Borracha Nitrílica (NBR) - Possui grande utilização em equipamentos com isolamento a base de óleo naftênico devido sua adequada compatibilidade com este isolante. Utilizada em temperatura de operação entre -30°C a 120°C, com Grau de Dureza de 70 Shore A;
- Fluoroelastômero (FKM) - Utilizada na fabricação de anéis de vedação (*o-rings*). Possui adequada compatibilidade ao óleo naftênico e faixa de temperatura de operação mais larga que os anteriores, entre -30°C a 180°C, com Grau de Dureza de 70 Shore A;
- Fluorosilicone - Possui adequada compatibilidade ao óleo naftênico e faixa de temperatura de operação, entre -60°C a 180°C.

##### *Papelão Hidráulico:*

Adequado do ponto de vista de resistência química para contato com óleo naftênico e temperatura. No entanto, exige um melhor nível de acabamento superficial, o que implica em maior custo quando comparado com os elastômeros. Sua composição utiliza fibra de amianto como base, material nocivo à saúde humana, mas existe composição de papelão que utiliza elastômero, substituindo o amianto.

*PTFE (Politetrafluoretileno):*

Material com alta resistência mecânica a deformação, estabilidade ao contato com óleo naftênico e adequado à faixa de temperatura operacional dos reatores, entre -210°C a 260°C.

#### 2.4.4.5 Indicador de nível de óleo

Geralmente os reatores preenchidos com líquido isolante possuem algum tipo de indicador que permite a visualização do seu nível que está relacionado com a temperatura do óleo e a do ambiente.

O sistema é acionado mecanicamente por um flutuador (bóia ou prato) acoplado a uma haste que se movimenta conforme a variação do nível do óleo, transferindo o movimento a um ponteiro do mostrador externo, conforme mostra a figura 2.15.

**Figura 2.15:** Indicador de nível de óleo



Fonte: [28]

No indicador magnético de nível a transferência de movimento (entre a parte interna e externa do tanque) é realizada por ímãs permanentes posicionados opostamente e separados por uma flange, sendo um conectado ao ponteiro do mostrador e outro a haste de acionamento, o que elimina o contato direto do óleo, reduzindo a possibilidade de vazamentos.

O seu mostrador possui em sua escala uma referência de volume de óleo a 25°C, que tem como função orientar o nível correto na temperatura ambiente. Desta forma também as marcações de máximo e de mínimo corresponderão aos respectivos volumes nas temperaturas máximas e mínimas admissíveis.

Além do indicador magnético mencionado, existe também a possibilidade de utilização de tubos de vidro para indicação do nível de óleo.

#### 2.4.4.6 Relé de gás

O dispositivo, mostrado na figura 2.16, constitui um dos principais acessórios de segurança e proteção intrínseca utilizados em reatores isolados a óleo e dotados de tanque de expansão.

**Figura 2.16:** Relé detector de gás



Fonte: Arquivo pessoal

O relé detector de gás tipo *Buchholz* é um dispositivo eletromecânico e tem por finalidade proteger continuamente o equipamento, visando detectar situações de formação de gases e a presença de fluxo anormal do líquido isolante. É constituído por sistemas de boias responsáveis pela atuação dos contatos de alarme e desligamento, com as seguintes funções:

- Reter gases gerados no interior do equipamento, produzindo um alarme (1º nível) quando o gás retido na câmara alcança um volume pré-ajustado de acordo com o tamanho do relé (de 100 a 300 cm<sup>3</sup>);
- Responder a um deslocamento rápido do líquido isolante, devido a ocorrência de uma falha interna no equipamento. O fluxo de óleo gerado atingindo o valor calibrado no relé detector de gás tipo *Buchholz* (ajuste entre 0,8 a 2m/s) acionará o contato referente ao desligamento (2º nível) e deve interromper o funcionamento do reator;
- Os contatos também atuarão pela perda de óleo isolante (vazamento).

O relé detector de gás tipo *Buchholz* é instalado em série com a tubulação que interliga o tanque principal com o tanque de expansão de óleo do equipamento. Uma seta gravada em alto relevo, na carcaça e/ou tampa do relé, indica o sentido correto para a sua instalação, ou seja, do tanque para o conservador.

O relé não é projetado para atuação com a movimentação normal do óleo provocada por dilatações e contrações térmicas, por efeito eletrodinâmico das bobinas e pelo fluxo reverso (deslocamento do óleo do conservador para o tanque),

porém em reatores com bombas de circulação forçada de óleo, que eventualmente possam provocar pico de velocidade no deslocamento do óleo, durante o seu ciclo de partida ou parada, uma regulagem especial deve ser efetuada na fábrica, para que o relé não atue indevidamente nestas situações.

Os relés *Buchholz* que possuem contatos de mercúrio (substância tóxica e nociva ao meio ambiente) são suscetíveis a alarmes e atuações indevidas causadas por vibrações. Existem relés com contatos do tipo magnético (*reed switch*) acionados por ímãs permanentes e resistentes a vibração, abalo sísmico e choque.

O relé dispõe de um registro para desaeração<sup>6</sup> e coleta de gás. Pode ser equipado com uma tubulação fina do registro do relé detector de gás tipo *Buchholz* até um receptor de gás ao nível do solo, sendo possível tirar amostras sem a necessidade de desligamento do reator. Possui um dispositivo de teste manual para acionamento dos contatos de alarme e de desligamento, que também pode ser usado para travar o mecanismo interno móvel do relé durante o transporte.

#### **2.4.4.7 Dispositivo de alívio de pressão**

O dispositivo de alívio de pressão tem como função minimizar o dano causado por um aumento de pressão interna, que pode ser súbito ou lento, decorrente de uma falha interna ou de um defeito no sistema de preservação do líquido isolante.

O dispositivo de alívio de pressão é uma válvula instalada no tanque principal do equipamento, composta de um disco metálico sob pressão de mola, conforme mostra a figura 2.17, e calibrado para permitir a descarga do líquido isolante em caso de pressão acima do estabelecido. É projetado para fechar automaticamente após a normalização da pressão, impedindo saída em excesso de óleo. Sua atuação é indicada localmente através de dispositivo de sinalização mecânica e remotamente através de contatos elétricos, podendo ter função de alarme ou desligamento. E cujos rearmes devem ser feitos manualmente.

---

<sup>6</sup> Desaeração – eliminação de gases dissolvidos através de um dispositivo mecânico chamado desaerador.

**Figura 2.17:** Dispositivo de alívio de pressão



Fonte: [28]

Além da válvula mencionada, existem reatores que possuem um tubo na forma de chaminé, mais alta que o tanque de expansão e fechado por uma membrana metálica ou de vidro, concebida para romper no caso de uma pressão elevada. Podem ainda ter uma lâmina na extremidade com um interruptor de posição para sinalização no caso de atuação.

#### **2.4.4.8 Indicador de fluxo**

Os indicadores do fluxo do óleo são utilizados em reatores que utilizam bombas de circulação forçada de líquido isolante para indicar a vazão nos circuitos de resfriamento. São instalados nas tubulações do conjunto formado entre o radiador ou trocador de calor e a bomba, podendo ser analógicos ou digitais.

O princípio de funcionamento do indicador analógico consiste em um sistema de palheta fixada a um eixo móvel orientado para a direção do fluxo. A vazão do óleo gerada pela bomba faz movimentar o eixo da paleta, transmitindo esse movimento do eixo ao ponteiro indicador através de ímãs permanentes, acoplados magneticamente. Esse acoplamento magnético possibilita a remoção da parte frontal sem vazamento de óleo da tubulação, pois há uma parede que isola a parte interior do tubo ao lado externo.

O princípio de funcionamento do indicador digital é semelhante ao analógico tendo como diferença a existência de um elemento de detecção que varia uma resistência dependendo do fluxo do líquido isolante, alterando o nível do sinal de corrente enviado ao indicador a partir de um transdutor, sinalizando sua circulação. Normalmente possuem conjuntos de contatos elétricos, que podem ser utilizados nos sistemas de supervisão e controle.

#### 2.4.4.9 Painel de controle

É o local onde estão instalados os dispositivos de interface, que permitem do centro de operação da subestação o controle e a monitoração do funcionamento do reator, como temperatura, corrente, monitoração de gases, descargas parciais, etc. O painel de controle fica localizado ao lado do tanque principal e os seus principais componentes são:

- Fiação e blocos terminais;
- Terminais dos enrolamentos dos transformadores de corrente (TC), de potencial (TP), sensores, fusíveis, disjuntores, filtros, contadores e relés;
- Dispositivo de supervisão local;
- Dispositivos de monitoramento digital;
- Resistência de aquecimento para evitar a condensação e exaustor para manter o painel de controle em condições climáticas adequadas para o funcionamento dos dispositivos e componentes instalados em seu interior.

A figura 2.18 mostra alguns dos componentes instalados no interior de um painel de controle.

**Figura 2.18:** Interior de um painel de controle



Fonte: [30]

#### 2.4.5 Sistema de isolamento

O sistema de isolamento de um reator convencional é constituído basicamente de uma combinação entre celulose e óleo isolante, que pode ser mineral (OMI) ou vegetal (OVI), ou ainda possuir uma isolação seca. No entanto, neste trabalho será abordada apenas a isolação que combina celulose e OMI.

### 2.4.5.1 Isolação sólida

Na parte ativa do reator é onde mais se observam as diversas aplicações do papel isolante no isolamento e arranjo das bobinas, formando um conjunto mecânica e eletricamente resistente com canais de refrigeração que permitem a circulação do óleo isolante no seu interior.

Os isolantes sólidos de materiais celulósicos utilizados normalmente são:

- Papel *kraft*, usado no isolamento entre espiras.
- Cartões prensados de alta densidade, à base de papel *kraft*, usados para espaçadores de enrolamentos (criação de canais de refrigeração para circulação de óleo) e suportes mecânicos (calços).
  - Cartões prensados de média-alta densidade à base de papel *kraft*, usados como isolamento entre enrolamentos e entre os enrolamentos e a terra (barreiras). Poderão também ser aplicados elementos pré-formados, desenhados de acordo com as condições de campo elétrico projetadas para o reator.
- Papel *kraft* do tipo crepado, que permite uma maior flexibilidade e elasticidade, adequado para o isolamento de formas irregulares e superfícies onde um adequado isolamento não pode ser obtido com papéis planos. Um exemplo típico para a sua aplicação é o enfitamento das pontas de ligação aos enrolamentos e condutores.
- Papel do tipo termo-estabilizado, ("*thermally upgraded*"), produzido a partir de papel *kraft* e sujeito a tratamento químico para melhoria do seu comportamento térmico, reduzindo a velocidade de degradação por ação da temperatura. Este papel tem aplicação no isolamento entre espiras, permitindo uma exploração a temperaturas mais elevadas.
- Madeira prensada (*permawood*), usada geralmente como calços e em locais onde se requer resistência a solicitações mecânicas.
- Papelão prensado (*presspan*), utilizado nas bobinas do enrolamento como cilindros para proporcionar fixação mecânica e isolação entre enrolamentos e núcleo. Este material também pode ser utilizado como enchimentos, calços e suportes.

Os materiais à base de papel *kraft* permitem uma elevada impregnação com óleo isolante mineral, o que resulta em excelentes características dielétricas. Em termos mecânicos permitem uma boa estabilidade geométrica no óleo, sendo

materiais de fácil manuseio para as diversas operações do processo de fabricação. No aspecto econômico, são os materiais mais atrativos para isolamento de reatores impregnados a óleo [28].

#### **2.4.5.2 Óleo mineral isolante**

Nos reatores a quantidade de óleo isolante pode representar cerca de 20 a 30% da sua massa total e tem dupla função: ser absorvido pelo papel isolante de forma a conferir características dielétricas especiais ao sistema isolante do reator e circular através dos enrolamentos e núcleo, superficialmente e através de canais, de forma a permitir a remoção do calor gerado no funcionamento normal, dissipando assim as perdas nos enrolamentos e no núcleo.

A facilidade de amostragem e análise do óleo isolante lhe dá a funcionalidade adicional de meio de diagnóstico do estado do reator, uma vez que estando em contato com os principais componentes ativos do reator, nele se irão refletir os fenômenos térmicos e elétricos associados a alterações de comportamento.

O óleo também pode exercer funções regenerativas, através da remoção de contaminantes e de umidade, atuando de forma benéfica sobre os materiais isolantes sólidos e enrolamentos. Esta ação do óleo é obtida da sua circulação por equipamentos de tratamento e regeneração. Estes processos, além de serem realizáveis no local de instalação e não invasivos podem, em certas condições, ser aplicados com o reator em serviço.

Os óleos minerais isolantes são produtos obtidos pelo refinamento do petróleo, que permite atingir as propriedades desejadas para a sua particular aplicação. Os óleos isolantes são habitualmente classificados como parafínicos ou naftênicos, de acordo com o tipo de refinamento. De acordo com [31], os óleos naftênicos apresentam melhores propriedades a baixa temperatura e capacidade de dissolver subprodutos resultantes da oxidação, podendo diminuir a precipitação de sedimentos, lamas nos enrolamentos e bloqueios dos canais de circulação.

As propriedades dos óleos isolantes novos devem obedecer, no mínimo, às prescrições da norma IEC 60296, que constitui um referencial nos países europeus. A estabilidade do óleo à oxidação é um fator crucial na sua vida útil, dependendo da presença de antioxidantes. Estes podem ser componentes naturais no óleo (óleos não inibidos), ou aditivos sintéticos utilizados para reforçar o desempenho do óleo isolante (óleos inibidos). Existem também óleos cuja classe admite “vestígios” de

inibidor até uma concentração máxima de 0,08% (*trace inhibited*). Em óleos inibidos a concentração de inibidor é também limitada, não devendo ultrapassar os 0,4%, conforme especificado pela mencionada norma IEC 60296.

Os processos de refinamento permitem remover contaminantes do óleo como: enxofre, nitrogênio, metais pesados e compostos aromáticos [32]. No entanto, alguns destes compostos de enxofre atuam como inibidores naturais antioxidantes, motivo pelo qual, nos processos de refinamento de óleos não inibidos, nem todos os compostos de enxofre devem ser removidos [33]. Os óleos com déficit destes produtos, sujeitos a um grau de refinamento superior, podem ser compensados com a adição de inibidores de oxidação.

A partir do momento da sua aplicação no enchimento do equipamento, o óleo passa a ser considerado “usado”, deixando de ser avaliado pela norma IEC 60296 e passando a ser avaliado de acordo com a norma internacional IEC 60422 [34].

Para o cumprimento da sua função dielétrica e de refrigeração, os óleos devem possuir e manter ao longo do tempo as seguintes características:

- Elevada rigidez dielétrica para suportar as solicitações as quais serão submetidos em serviço.
- Viscosidade suficientemente baixa de modo a não afetar a capacidade de circulação e transferência de calor.
- Propriedades adequadas às temperaturas mínimas esperadas no local de utilização.
- Resistência à oxidação de modo a maximizar o tempo de vida útil.
- Não possuir efeito corrosivo para os materiais com que estará em contato.

O óleo isolante pode sofrer contaminação e envelhecimento por degradação das propriedades físico-químicas pelo efeito da temperatura, ar, umidade e partículas contaminantes.

Os principais contaminantes do óleo são a umidade (através do ingresso a partir da atmosfera ou pela formação de moléculas de água por degradação da celulose e do óleo) e partículas.

A avaliação da qualidade do óleo deve ser realizada periodicamente, através de um conjunto de ensaios físico-químicos e dielétricos que permitem monitorar o seu comportamento ao longo do tempo. De acordo com a norma IEC 60422, os

ensaios podem ser classificados quanto à sua necessidade, agrupando-se nos seguintes tipos:

- Ensaios de rotina, que devem ser realizados periodicamente de forma a avaliar a evolução dos resultados.
- Ensaios complementares, cuja realização é recomendada com base nos resultados dos ensaios de rotina.
- Ensaios especiais, utilizados para caracterização do tipo de óleo, quando se verifique essa necessidade em circunstâncias especiais.

Uma abordagem mais detalhada do sistema de isolamento será feita no capítulo 3, pois embora defeitos possam surgir em qualquer componente do reator o conceito de envelhecimento está fortemente associado aos materiais isolantes, celulose e óleo mineral isolante, fazendo do sistema de isolamento um dos fatores determinantes para caracterização do fim da vida útil dos reatores.

### **3 Ciclo de vida de reatores**

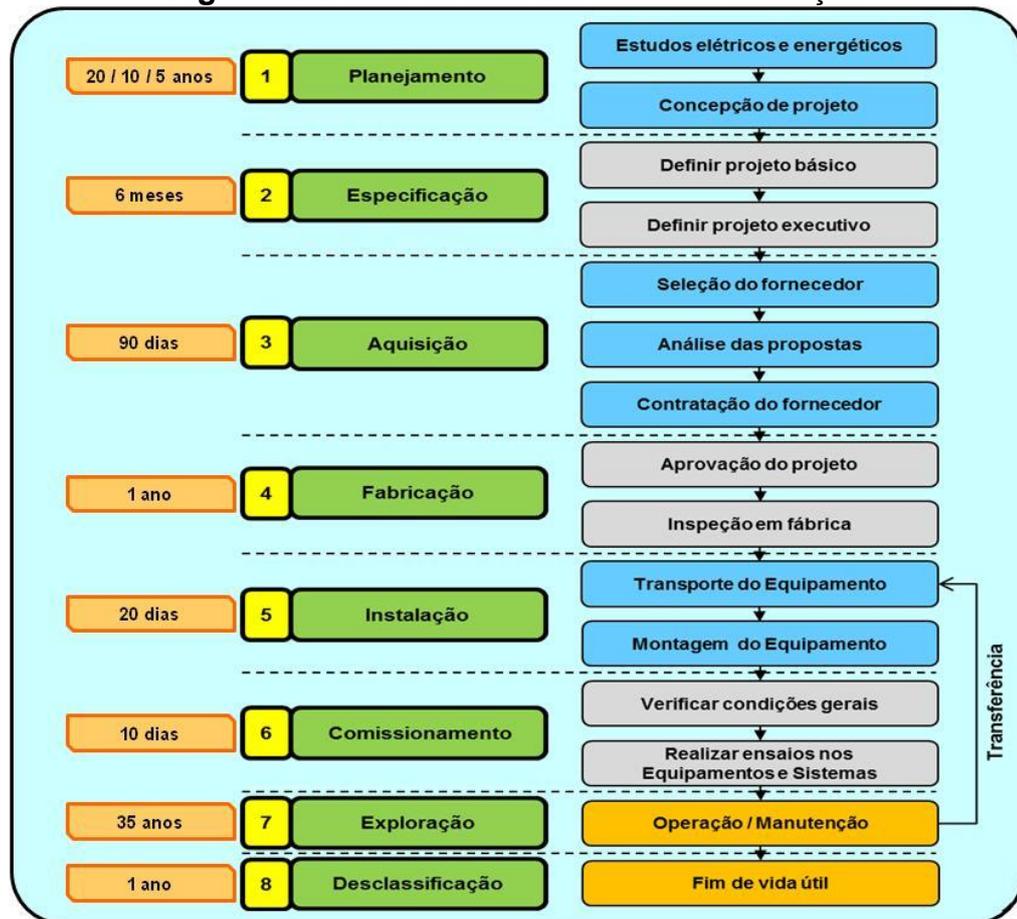
#### **3.1 Ciclo de vida**

O ciclo de vida de um reator em derivação envolve uma série de etapas e está condicionado às decisões e ações executadas em cada uma delas. Cada etapa engloba atividades específicas das quais vai depender toda a vida útil do equipamento.

No planejamento são realizados estudos elétricos e energéticos que identificam a necessidade do uso de reatores no sistema elétrico, e então se inicia a concepção do projeto. A partir das necessidades levantadas parte-se para a especificação do reator com a definição de um projeto básico e de um projeto executivo com definições inclusive da previsão de entrada em operação do reator. A etapa seguinte refere-se à aquisição do reator que contempla a seleção do fornecedor através da análise de propostas que embasarão sua contratação. Na etapa de fabricação o projeto do equipamento é elaborado pelo fabricante, com base nas especificações do cliente e, após aprovado e construído, deverá ser submetido às inspeções e ensaios em fábrica. A etapa de instalação engloba o transporte e a montagem do equipamento e após sua conclusão se inicia a etapa de comissionamento onde são verificadas as condições gerais do reator e são realizados ensaios no equipamento e sua interação com o sistema elétrico de potência. A partir de então o equipamento entra na etapa de exploração, período onde está contida a operação e manutenção do reator até se alcançar a desclassificação do equipamento.

Em alguns casos, o reator pode ser realocado para outra subestação, e neste caso se inicia uma nova etapa de exploração. A sequência cronológica do ciclo de vida do reator pode ser observada na figura 3.1.

**Figura 3.1:** Ciclo de vida do reator em derivação



Fonte: [35]

Apesar de o ciclo de vida do reator ser intrinsicamente dependente de cada etapa descrita anteriormente, neste trabalho serão abordados apenas aspectos relativos à gestão do ciclo de vida de um reator em derivação na sua fase de exploração, que contempla o conjunto de processos de operação e manutenção de acordo com as perspectivas da empresa onde este estudo foi realizado.

A operação é a etapa em que o reator deve cumprir com a sua funcionalidade, de forma segura, eficiente e confiável. A operação é condicionada pelas exigências da rede onde o equipamento está inserido, pelas condições ambientais, ocorrência de eventos ou incidentes, necessidade de manobras e eventuais contingências, ou seja, fatores que não são controlados pela gestão do ciclo de vida do reator, mas que influenciam nesse ciclo; devendo por isso ser registados em conjunto com os regimes de funcionamento e as perturbações ocorridas na rede, para ter seu desempenho avaliado de forma sistemática.

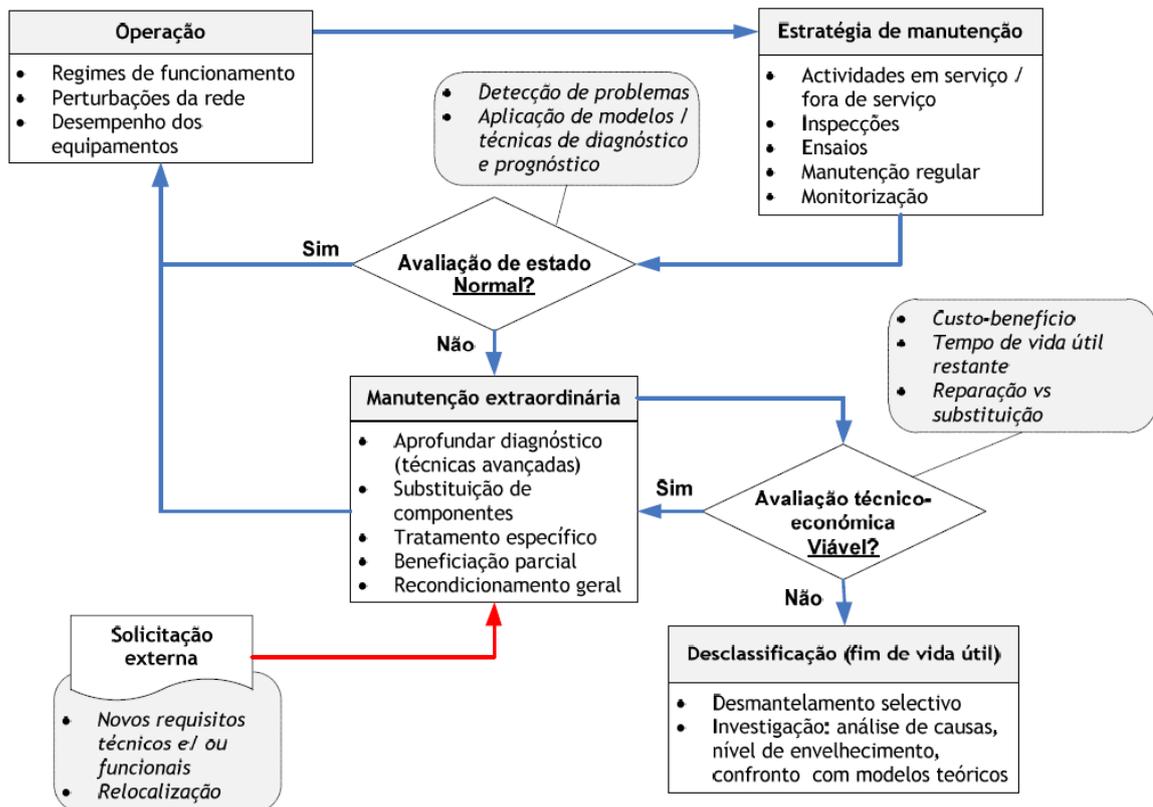
Os processos de manutenção podem ser de carácter regular, de acordo com a estratégia definida, ou atividades extraordinárias, que resultam da avaliação de

estado dos equipamentos ou de solicitações externas, tais como pedidos de realocação ou alteração de requisitos técnicos e/ou funcionais.

Um maior detalhe das atividades e processos que se desenvolvem na etapa de exploração e suas interações podem ser observados na figura 3.2 a seguir. Onde se enquadram em conjunto com a operação e manutenção, na fase de exploração os seguintes processos de avaliação e apoio a decisão:

- Avaliação de estado – aplicação de técnicas e modelos de diagnóstico e prognóstico.
- Avaliação técnico-econômica – sempre que se depara com situações cuja resolução implique intervenção profunda e investimento significativo.

**Figura 3.2:** Atividades e processos na fase de exploração



Fonte: [35]

Os processos de avaliação e decisão indicados originam recomendações de ações de manutenção a executar, mas também recomendações a considerar em outras etapas do ciclo de vida do reator, tais como planejamento de necessidades; especificação técnica de componentes, materiais, dimensionamento e projeto; comissionamento com a previsão de ensaios a serem executados e obtenção de valores de referência; operação com definições de capacidade de sobrecarga,

limitações de carga, procedimentos para manobras mediante atuação de proteções próprias e etc.

### **3.2 Expectativa de vida**

Estimar de forma absoluta, em anos, a vida restante de um reator é difícil, pois implica em muitas suposições, que vão desde a definição clara do final de vida até previsões de falhas ou defeitos futuros. O ponto de final de vida é uma variável desconhecida, no entanto existe um grande debate entre a comunidade do setor acerca dos valores esperados para a “vida normal” e o critério de “final de vida” deste equipamento.

De acordo com [36] o ponto final de vida de um reator pode ser classificado, de forma resumida, da seguinte maneira:

- Final de vida técnico: ocorre quando o reator poderia ou deveria ser posto fora de serviço devido a razões técnicas, físicas ou a uma certa debilidade da integridade técnica do equipamento.
- Final de vida estratégico: originado por mudanças na rede, como por exemplo, mudança de carregamento e tensão de serviço, etc.
- Final de vida econômico: ocorre devido a condições econômicas da empresa encarregada do equipamento, por exemplo, gestão das perdas e custos de manutenção.

Em geral, um reator é um dispositivo muito confiável e conforme a Resolução Normativa da ANEEL 474/2012 deve ser especificado para operar continuamente na máxima tensão operação da rede, durante toda sua vida útil, com uma expectativa de vida útil de 35 anos. Embora na prática a vida de um reator possa ultrapassar esta expectativa se submetido a uma manutenção adequada, dependendo da data de fabricação, uma vez que tem-se observado que reatores produzidos recentemente tem falhado com menos de 30 anos em idênticas condições de trabalho [37].

O processo de envelhecimento do reator pode ocorrer de diversas maneiras, uma vez que o equipamento está exposto a solicitações térmicas, mecânicas, elétricas ou provocadas pelo meio ambiente. No entanto, o tempo de vida útil de um reator é condicionado essencialmente por dois fatores:

- A velocidade de envelhecimento e perda de robustez dos seus materiais e componentes.
- As condições de funcionamento a que está sujeito ao longo do tempo, tais como regime de carga, condições ambientais, curto circuitos, sobretensões, defeitos e esforços.

Embora defeitos possam surgir em qualquer componente do reator ao longo de sua vida útil, principalmente buchas e vedações, e que alguns desses componentes tenham expectativa de vida inferior a 35 anos, o conceito de envelhecimento está diretamente associado a sua isolação sólida, uma vez que ela não pode ser substituída sem a desmontagem completa do reator e isto demanda custos significativos.

Com base nessas afirmações, várias são as maneiras de se obter uma expectativa de vida para o reator, dentre elas pode-se resumidamente citar as mais empregadas no setor:

- A partir da análise físico-química das propriedades do papel isolante: para esta situação é necessário que se abra o reator e retire uma amostra do papel isolante dos enrolamentos. As desvantagens são a necessidade de retirar o reator de serviço e abrir seu tanque. Como resultado desta análise obtém-se o grau de polimerização (GP) da amostra de papel. O GP indica quão próximo o papel se encontra do fim da vida útil;
- A partir do acompanhamento do teor de 2-furfuraldeído (2Fal): isto pode ser feito para reatores novos ou reformados, acompanhando o crescimento do teor de furfural do óleo desde a entrada em operação. A desvantagem consiste em que, quando há substituição do óleo ou quando é feito o processo de secagem, elimina-se instantaneamente a referência para a análise dos dados, no entanto estudos mostram que os teores de 2Fal tendem a voltar a valores próximos aos anteriores entre 6 meses e 1 ano após o tratamento do óleo.
- A partir do acompanhamento das temperaturas do interior do equipamento: apesar de ser um meio indireto de se estimar a vida útil de reatores tem-se a vantagem de não ser um método invasivo, sem necessitar da abertura do reator. Isto é permitido, pois se pode estimar a degradação do papel de acordo com a teoria de Arrhenius [38].

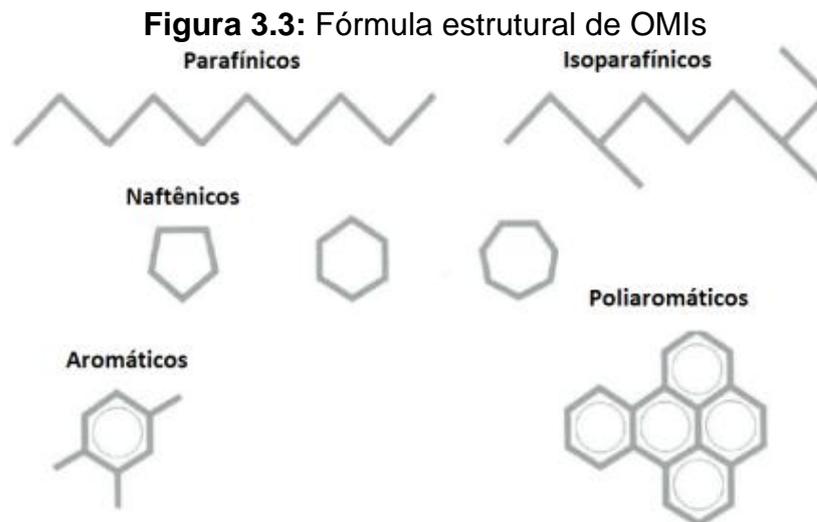
Estes métodos serão melhores discutidos à medida que seus conceitos forem necessários no decorrer deste capítulo.

### 3.3 Envelhecimento do reator

Como o envelhecimento do reator está diretamente relacionado à degradação de sua isolamento sólida, serão tratados neste item os mecanismos que direta ou indiretamente contribuem para a degradação do papel.

#### 3.3.1 Degradação do óleo isolante

O óleo mineral isolante, que pode ser parafínico ou naftênico, de acordo com o tipo de refinamento do petróleo, conforme abordado no capítulo 2, deve possuir diversas características para cumprir suas funções de isolamento e refrigeração dentro de um reator. Sua estrutura molecular é composta principalmente por carbono e hidrogênio, conforme mostra a figura 3.3.



Fonte: [39]

De acordo com [34], após o enchimento final e antes da entrada em serviço, o óleo deve cumprir requisitos mínimos, conforme mostra a tabela 3.1. A caracterização das propriedades do óleo antes e imediatamente após a entrada em serviço do reator deve ser a mais completa possível, de forma a criar uma linha de referência que irá auxiliar os diagnósticos futuros, com base nas análises do óleo isolante.

**Tabela 3.1:** Requisitos mínimos recomendados para OMI em equipamentos novos

Propriedade	Requisito
Aspecto	Límpido, livre de materiais em suspensão.
Cor (escala ISO 2049)	< 2,0
Tensão disruptiva	≥ 60 Kv
Teor de água	< 10 mg/kg
Índice de acidez	< 0,03 mg HOH/g
Fator de dissipação dielétrica	< 0,01 (tg δ a 90 °C / 50 Hz)
Resistividade a 90°C	≥ 60 GΩm
Ensaio de estanqueidade à oxidação - Óleo não inibido: 164 h/120 °C - Óleo inibido: 500 h/120 °C	Índ. Acidez < 1,2 mg HOH/g Depósitos < 0,8% (Tg δ a 90 °C / 50 Hz) < 0,01
Tensão interfacial	≥ 35 mN/m
Conteúdo de PCBs	Não detectável ( < 2mg/kg)
Partículas*	De acordo com CEI 60422-Anexo B

\* Para constituir valor de referência

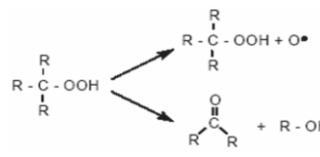
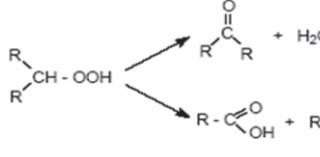
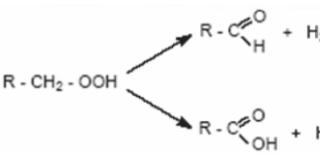
Fonte: [35]

A degradação do óleo isolante é um processo contínuo durante a operação do reator. Suas propriedades físicas, químicas e elétricas podem sofrer alterações provocadas pela ação do oxigênio, da temperatura (sobreaquecimento localizado ou generalizado), da contaminação por umidade, da contaminação com partículas ou fibras (materiais utilizados na construção) e pela exposição a esforços elétricos (arco ou descargas elétricas) [40] e [41].

Como resultado deste processo tem-se a deterioração das propriedades isolantes do óleo, a formação de borras e conseqüentemente a aceleração do processo de degradação da celulose.

A **oxidação** do óleo mineral isolante, constituído principalmente por hidrocarbonetos, é regida pelo processo de peroxidação, onde um radical livre, formado fotoquimicamente ou por ativação térmica, forma inúmeros radicais livres através de uma reação em cadeia exponencial. A velocidade da reação aumenta com o aumento da temperatura também de forma exponencial. A tabela 3.2, mostra os vários produtos da oxidação que podem ser diferentes de acordo com sua origem [42].

**Tabela 3.2:** Produtos da oxidação do óleo mineral isolante

Descrição	Reação
Formação de Álcool e Cetona a partir de Hidroperóxido Terciário	 $\begin{array}{l} \text{R} \\   \\ \text{R}-\text{C}-\text{OOH} \\   \\ \text{R} \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{l} \text{R} \\   \\ \text{R}-\text{C}-\text{OOH} + \text{O}^\bullet \\   \\ \text{R} \\ \text{R}-\text{C}(=\text{O})-\text{R} + \text{R}-\text{OH} \end{array}$
Formação de Cetona e Ácido a partir de Hidroperóxido Secundário	 $\begin{array}{l} \text{O} \\    \\ \text{R}-\text{CH}-\text{OOH} \\   \\ \text{R} \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{l} \text{O} \\    \\ \text{R}-\text{C}-\text{R} + \text{H}_2\text{O} \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} + \text{RH} \end{array}$
Formação de Aldeído e Ácido a partir de Hidroperóxido Primário	 $\text{R}-\text{CH}_2-\text{OOH} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{l} \text{R}-\text{C}-\text{H} + \text{H}_2\text{O} \\ \text{O} \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} + \text{H}_2 \end{array}$

Fonte: [42]

Posteriormente, estes produtos intermediários da oxidação, sob a presença de oxigênio originam os ácidos carboxílicos, que finalmente polimerizam formando compostos de alto peso molecular, a “borra”, que se deposita sobre a isolação de celulose, e em conjunto com outros fatores, iniciam o processo de degradação da mesma. Elas também podem se precipitar sobre partes do reator críticas para a manutenção da eficiência do seu sistema de refrigeração, tais como dutos de circulação de óleo, aletas de radiadores, núcleo e enrolamentos. E o sobreaquecimento daí resultante irá acelerar ainda mais o processo de degradação do óleo, tornando-o um processo cumulativo.

Todos os equipamentos em que se verifique o contato do óleo com o ar estão sujeitos à oxidação, o que é o caso dos reatores em derivação com conservador normal. Nestes casos, a oxidação é inevitável, ocorrendo gradualmente ao longo dos anos.

A utilização de reatores com conservador do tipo bolsa tende a reduzir a velocidade de degradação do óleo isolante por efeito da oxidação. E o uso de inibidores de oxidação como o *diterc-butil-paracresol* (DBPC), que atua na etapa de formação de radicais livres e peróxidos, retarda a oxidação estendendo a vida útil do óleo mineral isolante.

Este fenômeno de oxidação acelera com o aumento da temperatura de funcionamento do óleo e com as mudanças bruscas na temperatura ambiente, pois o ar atmosférico pode ser aspirado para dentro do reator, se suas vedações não

estiverem em boas condições. A oxidação pode também ser acelerada pela presença de catalisadores, como metais ou compostos metálicos remanescentes do processo de fabricação do equipamento.

Além de borras, os efeitos da oxidação do óleo refletem-se na produção de água e ácidos e no escurecimento de sua cor. A água e os ácidos, gerados pela decomposição química do óleo, podem provocar corrosão das superfícies metálicas, atacar o material de celulose, resultando numa perda de resistência mecânica e até sua possível ruptura.

Embora o óleo mineral isolante com alto teor de oxidação possa ser recuperado por processos regenerativos, este procedimento não restaura a perda de vida útil já sofrida do equipamento.

A **contaminação por umidade** pode ocorrer no óleo a partir da sua própria degradação por oxidação, pela degradação da celulose, ou através do ingresso a partir do exterior, devido ao contato com o ar através do conservador do tipo normal ou trabalhos de manutenção que exijam a abertura de alguma entrada do reator. A água é solúvel no óleo até certos limites, que dependem da sua acidez e temperatura (valor de umidade de saturação). Um teor de água elevado pode provocar uma diminuição significativa da rigidez dielétrica comprometendo desta forma sua função de isolamento.

A **contaminação por partículas e fibras** ocorre pela libertação desses materiais dos componentes internos do reator, por subprodutos devidos a arco elétrico, por resíduos de materiais utilizados na fabricação ou pelo ingresso a partir do exterior durante operações de manutenção ou reparação. A sua presença pode afetar a rigidez dielétrica, especialmente quando acompanhada de umidade, podendo também provocar um aumento do fator dissipação ( $\text{tg } \delta$ ) do óleo.

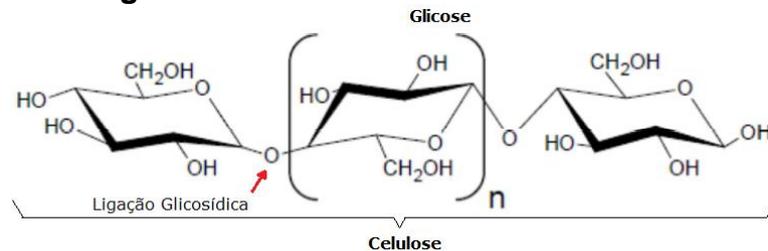
A presença de arco ou descargas elétricas produz gases que podem originar subprodutos como carvão e partículas metálicas. A degradação do óleo desta forma resulta na redução da rigidez dielétrica, aceleração da oxidação e aumento da acidez.

### 3.3.2 Degradação do papel isolante

O principal componente do isolamento sólido da maioria dos reatores é a celulose, um polímero natural encontrado nas plantas, cuja molécula é formada por

uma longa cadeia de anéis de glicose, ligados por ligações glicosídicas, conforme a fórmula estrutural apresentada na figura 3.4.

**Figura 3.4:** Fórmula estrutural da celulose



Fonte: [39]

Considerando que a fibra de celulose é composta de uma mistura de moléculas de celulose com diferentes tamanhos, o número médio de anéis de glicose em uma macromolécula de celulose define o grau de polimerização (GP). Através dos vários processos de degradação do papel, as ligações glicosídicas são quebradas e os anéis de glicose abrem, reduzindo-se assim gradualmente o GP. O envelhecimento do isolamento do reator ocorre, portanto por um fenômeno químico que acarreta progressiva oxidação, endurecimento do isolamento e, conseqüentemente, redução da rigidez dielétrica e perda de resistência mecânica.

O GP de um papel *kraft* novo varia de 1200 a 1500, porém após a secagem, no processo de fabricação do reator, o GP do papel *kraft* é reduzido para um valor variando entre 900 e 1000. Alguns autores classificam o grau de polimerização variando entre 100 a 250 como ponto de fim de vida útil do isolamento, sendo o valor igual a 200 o mais utilizado [28].

De acordo com a NBR-5416 [43], o grau de polimerização igual a 200 equivale a 20% de resistência mecânica inicial e um grau de polimerização em torno de 150 indica que o equipamento pode estar sujeito à falha, dependendo do nível de esforços mecânicos resultantes de curtos-circuitos externos.

Através de estudos Montsinger, em 1930, definiu que um reator atinge seu final de vida útil quando a resistência mecânica de seu material isolante sólido atinge 50% do seu valor inicial. No entanto a Norma IEEE C57.91-1995 afirma ter realizado ensaios em equipamentos com resistência mecânica do isolamento sólido abaixo de 20% do seu valor inicial e estes operaram de maneira satisfatória [44].

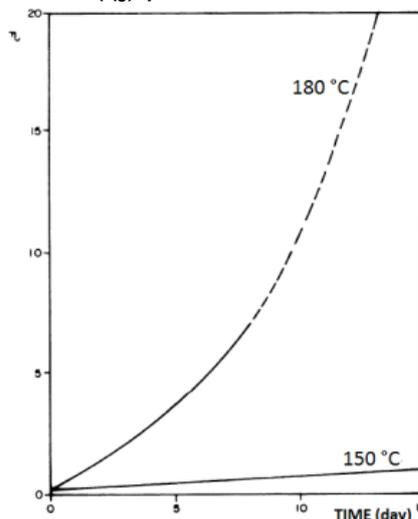
Basicamente são três os mecanismos responsáveis pelo envelhecimento da celulose na operação normal dos reatores: pirólise, hidrólise e oxidação.

Respectivamente, os agentes responsáveis por estes mecanismos são o calor, a água e o oxigênio [38].

A **pirólise**, ou degradação térmica da molécula de celulose se inicia devido à concentração de energia vibracional que é termicamente suprida por seus átomos em ligações individuais de C-H, C-O e C-C. À medida que isto quebra as ligações, compostos como a água, monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácidos orgânicos e glicose são formados. Nas pontas da molécula de celulose, um tipo específico de degradação térmica ocorre desacoplando a última glicose cuja estrutura é reorganizada para criar outra substância, principalmente levoglicosano [45] e [46].

MOSER [45] afirma que a pirólise pura ocorre em temperaturas entre 180 e 200°C. Entretanto, a celulose tem que estar seca e o ambiente deve estar livre de oxigênio para que a pirólise pura possa acontecer. Caso contrário, os outros dois tipos de degradação podem ocorrer ao mesmo tempo. Como mostra a figura 3.5, uma degradação mínima pode ser vista para o papel envelhecido a 150°C, provavelmente devido ao oxigênio residual, entretanto a 180°C, ocorre um aumento agudo na degradação.

**Figura 3.5:** Pirólise do papel *Kraft* em sistema fechado e livre de oxigênio. Número de quebras ( $\eta$ ) por cadeia a 150 e 180°C



Fonte: [44]

Darkin [47] em 1948 apresentou uma importante contribuição à definição da taxa de envelhecimento do isolamento, reconhecendo a natureza química do processo de envelhecimento térmico que ocorre na celulose e expressando o

resultado desta reação química em uma expressão matemática, equação 3.1, algumas vezes referida como a equação de Arrhenius.

$$t = A \cdot e^{B/T} = A \cdot e^{B/\theta+273} \quad (3.1)$$

onde:

$t$  - tempo em horas para alcançar o fim de vida definido;

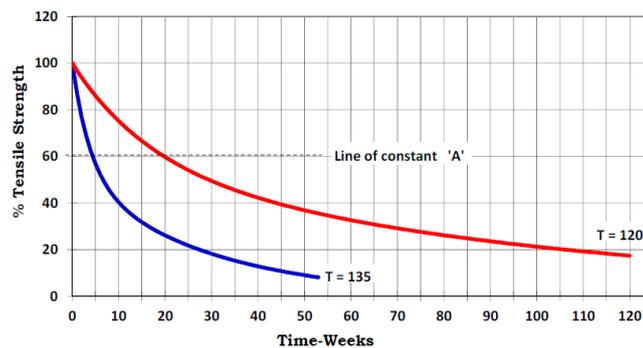
$A$  - constante determinada pela propriedade física selecionada para estabelecer o fim de vida;

$B$  - constante da taxa envelhecimento térmico, determinada pelo material usado no sistema de isolamento; é a medida da energia de ativação necessária para iniciar alterações químicas;

$\theta$  - temperatura do ponto mais quente do enrolamento em °C .

As constantes  $A$  e  $B$  são encontradas empiricamente. Alguns resultados experimentais típicos são mostrados nos gráficos da figura 3.6.

**Figura 3.6:** Tensão de tração versus o tempo  
Tensile Strength Of Manila Paper Aged In Oil



Fonte: [44]

Esta expressão teve uma larga aceitação na comunidade científica mundial nos anos seguintes. No entanto, McNutt [48] propôs uma nova definição de “vida do isolamento”. Esta se refere a uma vida por unidade (pu) para a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, e inclui os efeitos da umidade e de oxidação, conforme a equação 3.2.

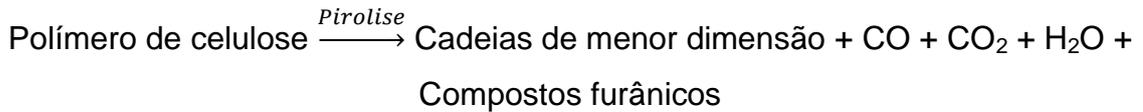
$$Vida_{pu} = A \cdot e^{B/T} f(n_1) f(n_2) \quad (3.2)$$

onde:

$f(n_1)$  - função considerando a umidade;

$f(n_2)$  - função considerando a oxidação;

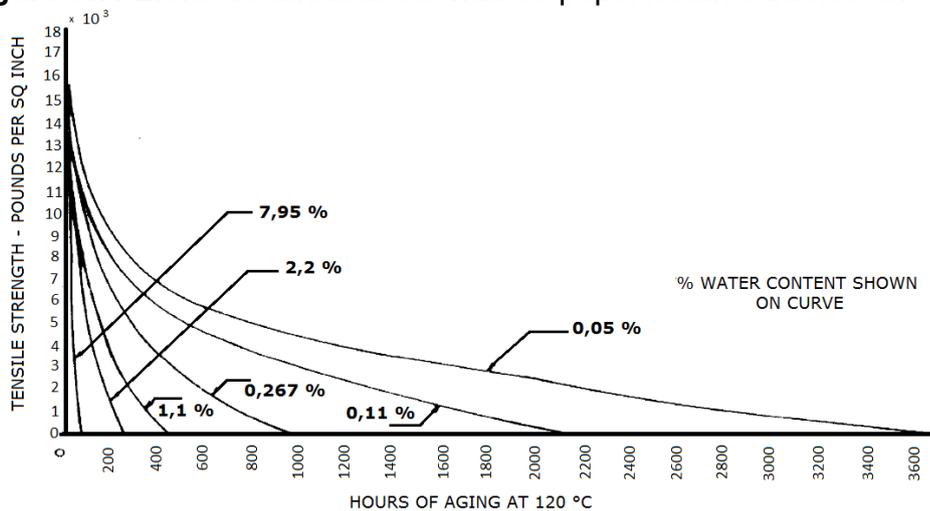
$A$  - constante modificada, derivada da escolha da temperatura de 110 °C como a temperatura estabelecida para 1 p.u. de vida útil do reator.



A **hidrólise**, degradação da celulose causada pela água, é catalisada pelos ácidos, produzidos na oxidação do óleo mineral isolante, que quebram a ligação glicosídica entre os dois resíduos de glicose. Embora alguma reação intermediária ocorra, o resultado final é a divisão de uma molécula de água para estabilizar o resíduo de glicose e a recuperação do catalisador ácido que iniciou a reação.

Um conjunto de experimentos laboratoriais, conforme mostra a figura 3.7, demonstra que a vida mecânica do papel é reduzida pela metade do seu valor original quando o teor de água dobra. O envelhecimento de papel *kraft* é também acelerado quando polares não ácidos estão presentes em óleos recuperados não inibidos. O uso do DBPC adia a conversão de polares não ácidos em compostos ácidos e conseqüente retarda o envelhecimento do papel [49]. Espera-se que um reator, após o processo de fabricação e secagem tenha uma umidade residual menor que 0,5%.

**Figura 3.7:** Efeito da umidade na vida do papel isolante imerso em óleo



Fonte: [44]

Uma vez que a vida do isolamento cai pela metade toda vez que o teor de água da celulose dobra, a função  $f(n_1)$  pode ser apresentada conforme mostra a expressão 3.3.

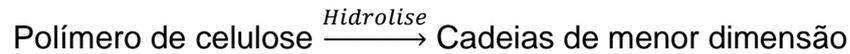
$$f(n_1) = \frac{e^{a_1/T}}{[n_1]} \quad (3.3)$$

onde:

$a_1$  - constante de envelhecimento por umidade ( $a_1 = -255,1$  para isolamento de  $55^\circ\text{C}$  /  $a_1 = -461,1$  para isolamento de  $65^\circ\text{C}$ );

$n_1$  - teor de umidade da celulose, expresso em % por massa do isolamento;

$T$  - temperatura absoluta, em graus Kelvin.

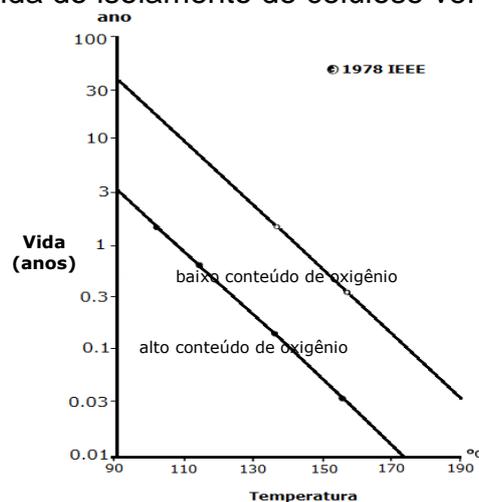


A **oxidação** degrada a celulose quando o oxigênio ataca o 6º átomo de carbono do anel de glicose para convertê-lo em aldeído ou ácido. Ele também pode atacar o 2º e/ou o 3º átomo de carbono para formar dois grupo de aldeídos ou dois grupos de ácidos. Assim o anel de glicose é conseqüentemente aberto e pode formar CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> além de água. Em conseqüência disto há um enfraquecimento ou mesmo a quebra das ligações glicosídicas conduzindo à despolimerização da molécula de celulose.

A cada cisão uma molécula de água é produzida, que por sua vez irá atacar novas ligações e provocar novas cisões da cadeia de celulose, portanto a hidrólise e as reações de oxidação não são independentes umas das outras.

Pesquisas afirmam que na presença de oxigênio, a velocidade de envelhecimento do papel aumenta de 2,5 a 10 vezes [46]. Teoricamente, isto significa que o papel em um reator aberto envelhecerá de 2,5 a 10 vezes mais rápido do que em uma unidade selada operando à mesma temperatura, conforme mostra a figura 3.8.

**Figura 3.8:** Vida do isolamento de celulose versus a temperatura



Fonte: [44]

Resultados experimentais reportados por Lampe e Spicar [46] permitiram concluir que a vida do isolamento celulósico pode ser multiplicado por um fator de 5, para mesma temperatura, por ausência de oxigênio, ou ainda nestas condições, a temperatura pode ser aumentada de 2,5°C, sem diminuição da vida útil do isolamento sólido.

Na tabela 3.3, McNutt [48] escolheu relacionar o envelhecimento por oxidação a baixo ou alto teor de oxigênio, dependendo se o reator é selado contra a entrada de oxigênio ou se é aberto à atmosfera. E empregou o índice de acidez do óleo para representar os efeitos da oxidação em razão da influência da acidez no processo de oxidação. Além de deixar implícita a influência que os inibidores do óleo têm na taxa de oxidação.

**Tabela 3.3:** Vida do isolamento sólido

Base	Teor de água dos enrolamentos* (%)	Nível de oxigênio	Vida (horas)
50 % da Tensão de Tração	0,5	Baixo	65.020
	1,0	Baixo	32.510
	2,0	Baixo	16.355
	0,5	Alto	26.000
	1,0	Alto	13.000
	2,0	Alto	6.500
20 % da Tensão de Tração	0,5	Baixo	152.000
	1,0	Baixo	76.000
	2,0	Baixo	38.000
	0,5	Alto	60.800
	1,0	Alto	30.400
	2,0	Alto	15.200
GP 200	0,5	Baixo	158.000
	1,0	Baixo	79.000
	2,0	Baixo	39.500
	0,5	Alto	63.200
	1,0	Alto	31.600
	2,0	Alto	15.800

\* Teor médio de água por massa

Fonte: [48]

O efeito da acidez do óleo na vida do isolamento não é tão simples como no caso da água. Com base em dados publicados por Clark [50], uma acidez de 0,1 mg KOH/g reduz a vida do isolamento a 65% de seu valor original e uma acidez de 0,3 mg KOH/g reduz a vida do isolamento a 50%.

Nesse caso a função  $f(n_2)$  pode ser mostrada como tendo a forma da expressão 3.4.

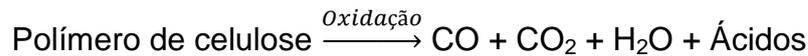
$$f(n_2) = -e^{a_2/T} \cdot \ln(n_2) \quad (3.4)$$

onde:

$a_2$  - constante de envelhecimento por oxidação ( $a_2 = -461,7$  para isolamento de  $55^\circ\text{C}$  /  $a_2 = -480,5$  para isolamento de  $65^\circ\text{C}$ );

$n_2$  - índice de acidez expresso em mg KOH/g;

$T$  - temperatura absoluta, em graus Kelvin.



Assim, considerando os três efeitos de degradação da celulose - temperatura, umidade e oxidação - a equação 3.2, expressão geral de expectativa de vida torna-se a equação 3.5:

$$Vida_{pu} = -\frac{A \cdot e^{(B+a_1+a_2)/T}}{[n_1]} \ln(n_2) \quad (3.5)$$

Em condições padrões, quando:  $T = T_{st} = 110^\circ\text{C}$ ;  $n_1 = 0,5$  ou  $0,3\%$  e  $n_2 = 0,03$  mg KOH/g. A equação 3.5 se reduz para a equação 3.6:

$$Vida_{pu} = A \cdot e^{B/T_{st}} \quad (3.6)$$

Não há um critério único para a avaliação do fim da vida do reator. Entretanto, segundo a NBR-5416/97 é possível fazer uma avaliação da velocidade do envelhecimento adicional a que está sendo submetido o equipamento, comparando a perda de vida com uma taxa de perda de vida média de referência, desde que o sistema de isolamento papel / óleo esteja dentro de alguns valores mostrados na tabela 3.4.

**Tabela 3.4:** Valores de referência para o cálculo da expectativa de vida

Ensaio	Limites
Umidade no papel (% por massa)	< 1
Índice de neutralização (mg KOH/g)	< 0,1
Teor de O <sub>2</sub> (ppm)	< 3000

Fonte: [43]

A perda de vida, ao longo de um período de tempo  $Dt$  (horas), em que a temperatura do ponto mais quente do enrolamento ( $\theta_e$ ) permanece constante, pode ser calculada pela equação 3.7. E o valor obtido representa a taxa de envelhecimento global a que é submetido o isolamento sólido, no intervalo de tempo  $Dt$ .

$$PV(\%) = 10^{-\left(\frac{B}{273 + \theta_e} + A\right)} \times 100\Delta t \quad (3.7)$$

onde:

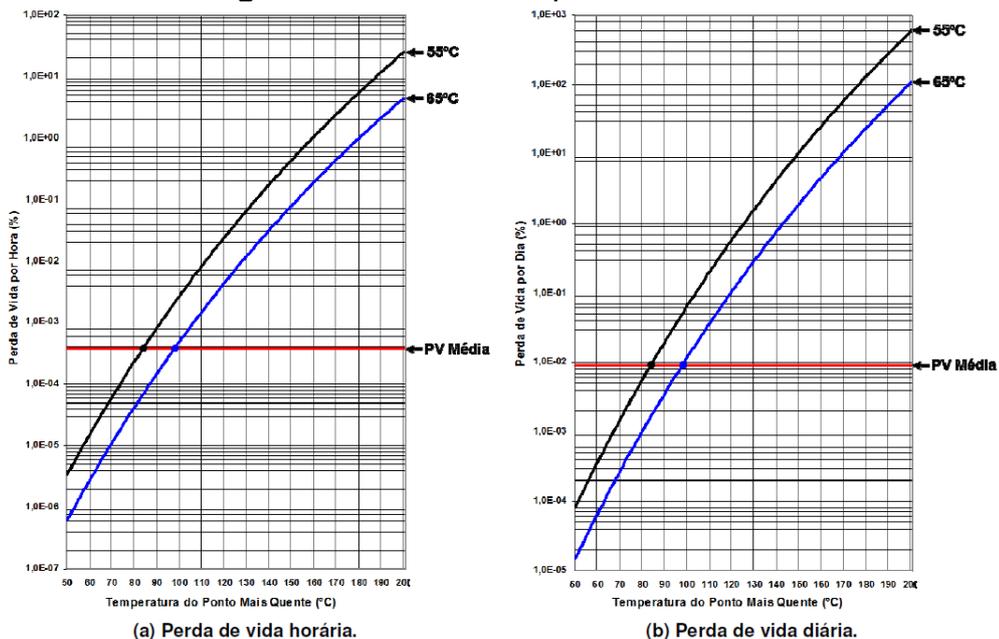
A = -14,133 (reator de 55°C);

A = -13,391 (reator de 65°C);

B = 6 972,15.

Com base nestas equações, a figura 3.9(a) representa a expectativa de perda de vida horária e a figura 3.9(b) representa a expectativa de perda de vida diária. Para não ter perda de vida útil adicional, a perda de vida horária poder até ser maior que a média horária (linha vermelha na figura 3.9(a)), mas a somatória das perdas de vida no ciclo de 24 h não pode ultrapassar o valor da perda de vida média diária (linha vermelha na figura 3.9(b)).

**Figura 3.9:** Curva de expectativa de vida



Fonte: [44]

### 3.4 Fatores agravantes para o envelhecimento do reator

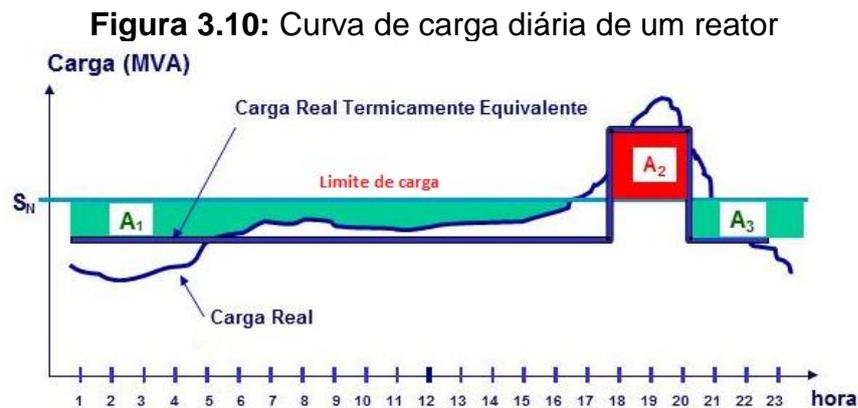
#### 3.4.1 Carregamento

Genericamente, o isolamento sólido é projetado para ser “consumido” em uma fração máxima diária de sua vida total, em condições de carregamento conhecidas. A base deste cálculo é sua potência nominal e temperatura ambiente

constante. Assim, a operação aquém destas condições garante uma “economia de vida”, enquanto o uso além destas, provoca um desgaste acelerado.

Se um reator fabricado segundo a norma ABNT NBR 5416 for operado constantemente na sua capacidade nominal, com temperatura ambiente controlada em 30 °C terá pelo menos 7,4 anos de vida e provavelmente não muito mais. Então se existem ainda outros fatores que aceleram o envelhecimento dos reatores, parece difícil explicar como existem unidades operando em muito boas condições por mais de 40 e até 50 anos.

Conforme pode ser observado na figura 3.10, ocorre que o ciclo de carga diário de um reator não é continuamente igual à carga nominal ( $S_N$ ). Ele varia de acordo com o período do dia, sendo superior à capacidade nominal no horário de pico, entre 17 e 21 horas, e inferior nos demais períodos, principalmente na madrugada. Além disso, no início de operação do reator a carga é baixa e aumenta, à medida que os anos se passam e a região elétrica atendida cresce.



Fonte: [44]

Este comportamento sazonal da carga introduz um processo de compensação, no qual o reator poupa vida, em relação à nominal, quando sua carga está aquém daquela que levaria o enrolamento a operar acima de certa temperatura, e consome vida, além da nominal, quando seu carregamento é excessivo. Assim, se ao longo do dia, a soma das áreas ( $A_1$ ) e ( $A_3$ ) for maior que a área ( $A_2$ ), o reator foi subutilizado, e a vida resultante pode ser creditada ao seu balanço de vida útil. Caso contrário, foi sobre utilizado, e a vida consumida além da nominal deve ser debitada deste. Isto explica porque alguns reatores têm ultrapassado o sua expectativa de vida útil.

A aplicação de carregamentos acima da potência nominal do reator depende principalmente da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, pois ela é a

principal responsável pelo envelhecimento do isolamento e, conseqüentemente, da deterioração da vida útil do reator. Operar um reator com temperatura do enrolamento acima do especificado implica em perda de vida adicional, além da nominal.

A temperatura ambiente também é um fator importante para a determinação da capacidade de carga do reator, uma vez que a elevação de temperatura para qualquer carga deve ser acrescida à ambiente para se obter a temperatura de operação.

A Norma IEEE C57.91-1995 [38], que aborda o efeito da temperatura ambiente, fornece uma tabela na qual é apresentado o acréscimo ou decréscimo percentual no carregamento de um reator, de acordo com o decréscimo ou acréscimo na temperatura ambiente, conforme a tabela 3.5.

**Tabela 3.5:** Alteração do carregamento com relação à temperatura ambiente

Tipo de resfriamento	% da Potência nominal do transformador	
	Decréscimo de carga para cada 1 °C de elevação da temperatura ambiente	Acréscimo de carga para cada 1 °C de queda da temperatura ambiente
Ventilação normal – AO	1,5	1,0
Resfriamento utilizando água – OW	1,5	1,0
Ventilação forçada – OA/FA, OA/FA/FA	1,0	0,75
Óleo e ar forçado e resfriamento utilizando água – FOA, FOW e OA/FOA/FOA	1,0	0,75

Fonte: [38]

Dessa forma, pode-se concluir que a temperatura ambiente é um parâmetro que não deve ser menosprezado ao se efetuar um cálculo de carregamento admissível em reatores. Acrescenta-se ainda a importância de se obter esses valores da maneira mais fiel e detalhada possível, de forma a se obter um melhor aproveitamento do equipamento.

Segundo a Norma NBR 5356 [51], os equipamentos são classificados, de acordo com suas características térmicas de operação, nas seguintes categorias:

- classe 55 °C: são os reatores cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 55 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 65 °C;

- classe 65 °C: são os reatores cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 65 °C e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 80 °C.

Partindo-se do princípio de que a deterioração do isolamento ocorre em praticamente todas as temperaturas, e o valor dessa deterioração é uma função do tempo, é impraticável fixar o exato valor de temperatura acima do qual os reatores não poderiam operar. Conclui-se a partir daí que, se a existência de uma temperatura acima do limite normal de operação ocorrer em um intervalo de tempo controlado, de acordo com as normas que tratam do assunto [38], [43], [52], o carregamento acima da potência nominal pode ser aplicado com segurança ao reator. Em outras palavras, o reator pode ser frequentemente carregado além dos limites nominais, desde que esse carregamento se dê de forma controlada [47].

Os carregamentos que podem ser contínuos, intermitentes, planejados, curtos ou emergenciais, foram especificados segundo a NBR 5416 em três tipos de carregamento: **normal**, no qual em nenhum momento é excedida a temperatura do topo do óleo ou a do ponto mais quente do enrolamento para a condição normal, mesmo que em parte do ciclo, seja ultrapassada a corrente nominal; **emergência de longa duração**, o qual permite que sejam ultrapassados os limites de temperatura do ciclo de carregamento em condição normal de operação, uma vez que são consideradas saídas prolongadas de unidades, durante o desligamento de algum elemento do sistema; **emergência de curta duração**, que envolve condições de maior risco, devendo, portanto ser utilizado apenas em raras ocasiões, e o tempo de operação nessa condição deve ser menor do que a constante de tempo térmica do reator e depende da temperatura em operação antes da contingência, não devendo ser maior que 30 minutos.

A tabela 3.6 mostra as temperaturas limites para cada tipo de carregamento e em função da sua classe de temperatura.

**Tabela 3.6:** Temperaturas limite por carregamento

Tipo de carregamento	Temperatura °C			
	Classe 55 °C		Classe 65 °C	
	Óleo	Ponto mais quente	Óleo	Ponto mais quente
Normal	95	105	105	120
Emergência de longa duração	105	120	110	130
Emergência de curta duração	105	130	110	140

Fonte: [53]

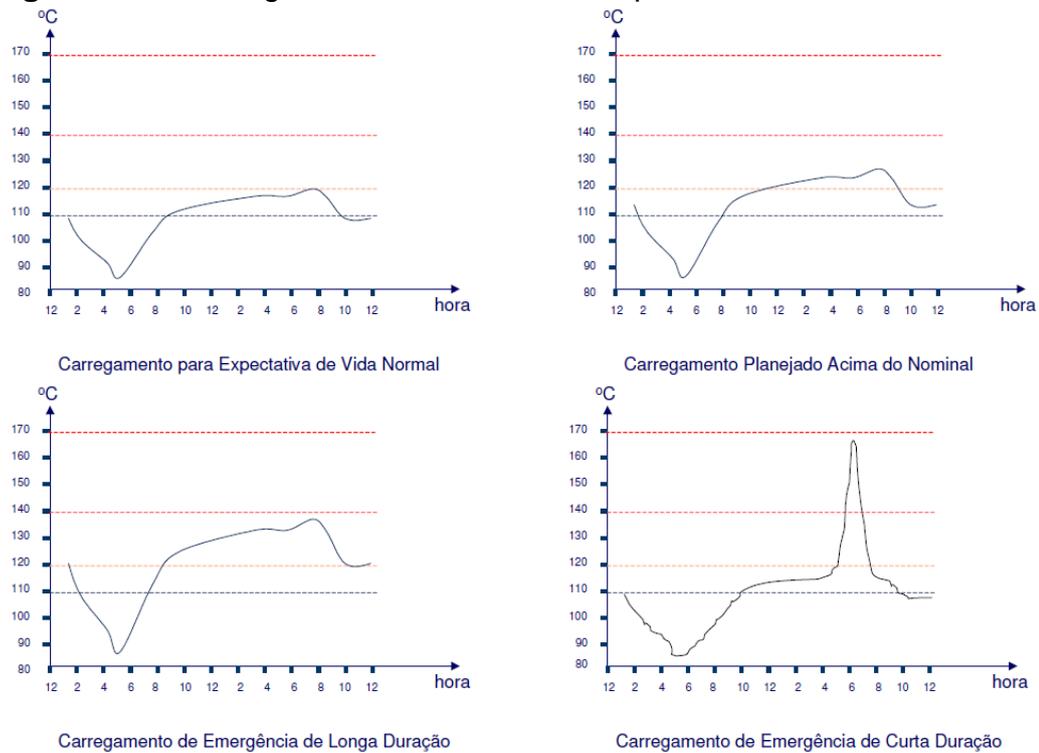
Como visto dependendo da aplicação, os carregamentos podem ou não causar perda adicional na vida útil. Existem, porém, alguns carregamentos que podem causar sérios danos, levando até mesmo a falhas no isolamento. Portanto, a aplicação de carregamentos superiores à potência nominal envolve algum grau de risco, tendo como possíveis consequências [38]:

- Produção de gás livre proveniente do isolamento dos condutores aquecidos pela carga e pelas correntes de *Foucault*, além das correntes criadas pelo fluxo nas partes estruturais do reator, o que pode danificar o seu isolamento;
- Produção de gás livre proveniente do isolamento adjacente, para as partes estruturais metálicas, ligadas pelo fluxo eletromagnético produzido pelas correntes no enrolamento, o que pode também reduzir a suportabilidade do isolamento;
- Operação em altas temperaturas, o que causa uma redução da resistência mecânica do isolamento estrutural e do condutor. Estes efeitos são de maior preocupação durante períodos de sobrecorrentes transitórias, quando as forças mecânicas envolvidas são muito grandes e conseqüentemente podem provocar uma falha no isolamento que se encontra com baixa resistência mecânica;
- Expansão térmica de condutores, materiais isolantes, ou partes estruturais que pode resultar na deformação permanente, contribuindo para falhas mecânicas ou de isolamento;
- Aumento da pressão nas buchas, que pode resultar em vazamentos nas juntas, perda de óleo e, em último caso, danos ao isolamento;
- Possível expansão do óleo além da capacidade do tanque, causando a operação do dispositivo de alívio de pressão.

Os limites referentes a uma operação em regime de carregamento acima da potência nominal e sobretensão são apresentados em normas como a NBR-5356 [51] e a ANSI/IEEE-C27.12.00 [54]. Esses limites são considerados muito conservativos por parte de usuários e fabricantes. A abordagem da norma ABNT NBR 5416 [43] sobre os limites de carregamento é bastante vaga neste sentido, deixando para o usuário a responsabilidade de definir o carregamento do reator se este for monitorado. Já a norma IEEE C57.91-1995 [38] traz uma abordagem baseada na temperatura ambiente, mas não define nenhuma outra condição de controle. De qualquer forma, como mostra a figura 3.11, a norma IEEE apresenta quatro regimes de carregamento, sendo dois deles de emergência, com

temperaturas, do ponto mais quente, muito elevadas se comparadas às recomendações dos outros guias mais usuais.

**Figura 3.11:** Carregamentos recomendados pela norma IEEE Std C57.91



Fonte: [38]

Desta forma em uma condição de emergência deseja-se manter o reator atendendo o sistema, mas quanto maior for o carregamento, mais quente se tornam enrolamento e óleo; isso pode fazer atuar as proteções de sobretemperatura de óleo e enrolamento. Mais calor é gerado e mais vapor de água dissolvido no isolamento de celulose se expande, gerando gases. Isso pode levar à formação de bolhas de gás, ativando o relé *Buchholz*. Gases têm rigidez dielétrica significativamente mais baixa que a do óleo ou isolamento celulósico. Isso pode gerar descargas e curto-circuito interno.

Todos esses riscos devem ser cuidadosamente considerados, e a avaliação da condição do reator deve ser realizada antes de submeter o mesmo a um carregamento acima do nominal. Dessa forma, garante-se o máximo aproveitamento do equipamento de maneira segura e confiável.

### 3.4.2 Sobretensão

Sobretensões são fenômenos transitórios que têm grande influência sobre o desempenho de reatores, podendo, em função da amplitude e duração, causar

danos que podem estar associados tanto ao aumento da sollicitação dielétrica dos materiais isolantes do enrolamento, quanto ao aumento generalizado de temperatura. Assim a sobretensão é sempre um motivo de preocupação, pois seus efeitos podem danificar de forma irreversível o enrolamento, o núcleo e o isolamento do reator.

Dentre os tipos de sobretensões existentes, os eventos de curta duração são mais difíceis de ser detectados e compreendidos, uma vez que são muito rápidos, da ordem de poucos ou frações de micro segundos, e dependem de características muito específicas de uma instalação. Os danos decorrentes dessas sobretensões estão diretamente associados à disrupção de arco elétrico interno ao reator. Nos eventos de longa duração os danos se manifestam através do aumento de temperatura do reator.

O aspecto da operação dos reatores em regime de sobretensão é abordado de maneira superficial nas normas e guias de carregamento, nacionais e internacionais [52], [54]. São apresentados limites considerados conservativos tanto por usuários, quanto por fabricantes, uma vez que o funcionamento desses equipamentos em condições de carregamento acima da potência nominal, combinado com sobretensões permanentes, vem se tornando uma situação comum na atual realidade do setor elétrico.

Os principais dos tipos de sobretensão podem ser divididas em: temporárias, de manobra, transitórias muito rápidas e de descargas atmosféricas.

As **sobretensões temporárias** são aquelas que se caracterizam pelo aumento da tensão fase-fase ou fase-terra de um sistema, de longa duração, geralmente da ordem de milissegundos a vários segundos, sendo fracamente ou não amortecidas.

O fator preponderante à suportabilidade de reatores a esse tipo de fenômeno está diretamente associado às características do núcleo ferromagnético, dado que é este componente o responsável pela formação e fechamento do circuito do magnético da parte ativa.

É natural que os fabricantes procurem elaborar projetos otimizados em que as condições nominais de operação do reator sejam muito próximas ao limite de fluxo magnético do núcleo, que é da ordem de 1,7 Tesla. E em eventos onde ocorre o aumento da tensão do sistema, dado que reatores são indutores não-lineares, o núcleo tende a saturar, provocando indesejáveis efeitos de natureza térmica.

Dentre estes efeitos pode-se citar o próprio aumento da temperatura do núcleo, resultando no sobreaquecimento do óleo isolante e materiais celulósicos, cujo efeito direto é a aceleração da deterioração dos materiais isolantes e conseqüentemente a diminuição da vida útil do reator e; o aumento da temperatura de partes metálicas periféricas do reator, como o tanque e a tampa, e nesse caso podem ocorrer danos à pintura e degradação de juntas de vedação.

Cabe observar que em função da inércia térmica de grandes reatores, dado que as massas do núcleo ferromagnético e do óleo isolante são ordem de dezenas de toneladas, os efeitos desse tipo de fenômeno são pouco comuns, restando como possível a ocorrência somente em casos onde o equipamento é submetido a longos períodos de operação nessa condição.

As causas de sobretensões temporárias são atribuídas a ocorrências no sistema ao qual o reator é conectado, como por exemplo, ferroressonância, ressonância a uma frequência em particular e rejeição de carga.

As **sobretensões de manobra** são resultados de operações de chaveamento ou falhas no sistema elétrico, se caracterizando por possuir uma frente de onda muito rápida e de curta duração, com espectro de frequência elevada. A magnitude e a duração desses surtos dependem de parâmetros e da configuração do sistema ao qual o reator é ligado, bem como das condições do chaveamento.

As sobretensões de manobra podem ter origem em: energização e re-energização da linha; ocorrência e extinção de faltas; manobra de cargas capacitivas, como banco de capacitores e; manobra de cargas indutivas como transformadores e reatores.

Tipicamente, a frente de onda dessas sobretensões pode variar de centenas de microsegundos até poucos milisegundos, sendo que a magnitude pode atingir níveis de até alguns p.u.

Os efeitos de sobretensões de manobra são substancialmente diferentes de sobretensões temporárias, uma vez que reatores se comportam de forma complexa quando submetidos a esse tipo de fenômeno.

Os componentes dielétricos do enrolamento do reator podem ser solicitados eletricamente de duas formas. Primeiro, a distribuição de tensão ao longo da bobina não será uniforme se o transitório tiver uma frente de onda muito rápida, resultando na concentração de tensão nas espiras/discos próximas à entrada da bobina, havendo a possibilidade de ruptura do meio dielétrico entre espiras nessa região.

Segundo, a bobina ou parte dela pode ressonar em algum tipo de frequência natural, caso a tensão transitória contenha essa componente de frequência. Nesta condição, pontos específicos da bobina podem atingir níveis de tensão mais altos do que aquele aplicado ao terminal do enrolamento. Pode causar a ruptura do meio dielétrico entre partes da bobina, mesmo se o nível de sobretensão estiver dentro dos limites de NBI (Nível Básico de Impulso) do reator.

As **sobretensões transitórias muito rápidas** (*Very Fast Transient – VFT*) são fenômenos cujas características principais são a ocorrência de frentes de onda muito rápidas e espectro de frequência elevada. Não há padronização das grandezas envolvidas, porém, se trata de eventos com frentes de onda de frações a poucos microssegundos, frequências de dezenas de kHz a alguns MHz, amplitude típica de 1,5 a 2 p.u., podendo chegar até a 2,5 p.u.

Normalmente ocorrem em sistemas isolados a gás Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>), conhecidos como *Gas Insulated Substation* (GIS), utilizados principalmente em sistemas de geração. São consequência da propagação de tensões originadas com a formação e reinição de arco elétrico na zona entre os contatos de dispositivos de manobra.

A forma de onda de um VFT é formada por sucessivas refrações e reflexões dessas tensões ao longo GIS. Devido à natureza de onda viajante e tempo de subida muito curto, a forma de onda do VFT pode ser significativamente diferente em pontos distintos da GIS, separados por apenas alguns metros.

Os VFTs que chegam ao enrolamento dos reatores são de difícil avaliação, dado que não dependem somente do tipo e comprimento de sua conexão à GIS, mas também das características do enrolamento do reator.

De uma forma geral, pode-se dizer que o enrolamento do reator é afetado por VFTs de duas formas: a frente de onda impulsiva cria uma distribuição de tensão extremamente não linear ao longo do enrolamento de alta tensão diretamente conectado ao sistema de SF<sub>6</sub>. Esta distribuição de tensão não linear cria consideráveis diferenças de potencial entre partes da bobina, podendo resultar em descargas elétricas entre discos ou entre espiras e; podem excitar e desenvolver tensões de ressonância parcial do enrolamento.

A forma extremamente não linear da distribuição de tensão associada a esses fenômenos podem resultar em imediata ruptura dielétrica dos materiais isolantes,

bem como a deterioração gradativa e cumulativa da isolação, resultando em falha futura, normalmente precedida de descargas parciais no ponto afetado.

Os danos por **sobretensões de descargas atmosféricas** são menos comuns em reatores quando comparados a eventos que envolvem sobretensões de manobra e VFTs, podendo ocorrer em função de uma descarga direta em um terminal do reator ou mesmo em função da limitação de proteção por conta da capacidade e distância de pára-raios instalados nas linhas.

No que concerne à manifestação desse tipo de problema, os danos podem se dar a partir da ruptura da isolação entre espiras do enrolamento, normalmente próximo ao terminal, entre bobinas ou até mesmo contra partes aterradas como o núcleo e tanque.

Além disso, é possível que esse tipo de sobretensão provoque a excitação parcial do enrolamento, resultando em danos semelhantes àqueles causados por sobretensões de manobra e VFTs.

### **3.5 Definição de vida útil restante**

Conforme já abordado os critérios de definição de vida útil restante são normalmente baseados nas propriedades mecânicas residuais do papel, como a tensão de ruptura, e na sua capacidade de resistir a esforços eletrodinâmicos que podem surgir durante a operação do reator como curtos circuitos, transitórios e etc. No entanto, a retirada de amostras de papel para ensaios de avaliação das propriedades mecânicas não é normalmente viável.

Existem alguns estudos sobre a correlação do grau de polimerização (GP) com a tensão de ruptura do papel isolante [55], sendo normalmente aceita essa relação de forma a estabelecer critérios de fim de vida útil apenas em função de GP estimado, que por sua vez corresponde a uma determinada resistência mecânica [39] e [56]. Assim a avaliação do tempo de vida útil restante pode então ser orientada para a determinação do GP num dado instante.

#### **3.5.1 Modelização química para determinação de GP**

O envelhecimento do papel pode ser descrito como uma reação química que obedece a uma equação de Arrhenius do tipo da equação 3.8:

$$k = \frac{\frac{1}{GP_t} - \frac{1}{GP_0}}{t} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT} \cdot t} \quad (3.8)$$

onde:

$k$  – constante de velocidade de envelhecimento;

$t$  – instante de tempo

$GP_t$  - corresponde ao GP no instante “ $t$ ”;

$GP_0$  - corresponde ao GP inicial;

$A$  - constante que depende do ambiente químico;

$E_a$  - energia de ativação da reação, em kJ/mole;

$R = 8,314$  J/mole/K - constante dos gases perfeitos;

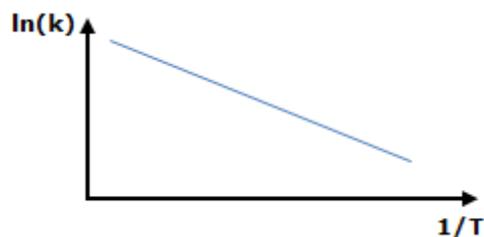
$T$  - temperatura absoluta, em graus Kelvin.

Esta reação pode ser representada através da equação 3.9 e de um gráfico da velocidade de envelhecimento ( $k$ ) em função de  $1/T$ :

$$\ln(k) = \ln(A) - \ln\left(\frac{E_a}{R}\right) - \frac{1}{T} \quad (3.9)$$

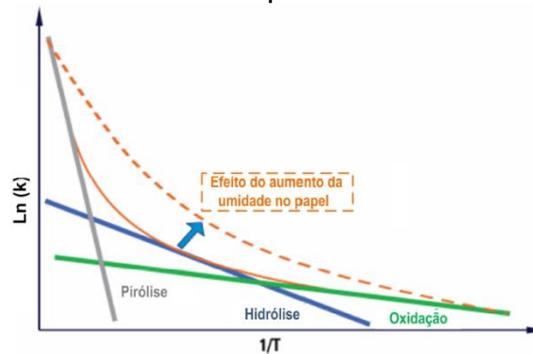
Assumindo um mesmo processo de envelhecimento sobre toda a gama de temperaturas, este gráfico será linear, interceptando o eixo das ordenadas no valor  $\ln(A)$  com um declive de  $\ln(E_a/R)$  como se pode ver na figura 3.12.

**Figura 3.12:** Gráfico de Arrhenius



Fonte: [35]

No entanto, de um modo geral é aceito que o envelhecimento da celulose pode ser descrito pelos processos de oxidação ( $O_2$ ), hidrólise ( $H_2O$ ) e pirólise (temperatura  $> 150$  °C). De acordo com [39], o efeito simultâneo destes processos resulta num gráfico de Arrhenius não linear, que se representa na figura 3.13.

**Figura 3.13:** Gráfico de Arrhenius sobrepondo os mecanismos de envelhecimento

Fonte: [39]

Os processos de oxidação e hidrólise são relevantes na avaliação do envelhecimento do papel a longo prazo, dado que o processo de pirólise ocorre para temperaturas muito superiores às de funcionamento do reator, estando relacionado já com processos destrutivos do papel.

Para a aplicação deste método é essencial dispor de valores para a energia de ativação adequada e para o fator ambiental “A”. De acordo com [55] e outros referidos em [39], propõem-se na tabela 3.7, valores para a energia de ativação e fator ambiental “A” a partir de resultados experimentais de testes de envelhecimento de vários tipos de papel (*kraft* e termoestabilizado) sob diferentes condições (de temperatura, umidade, acidez, oxigênio):

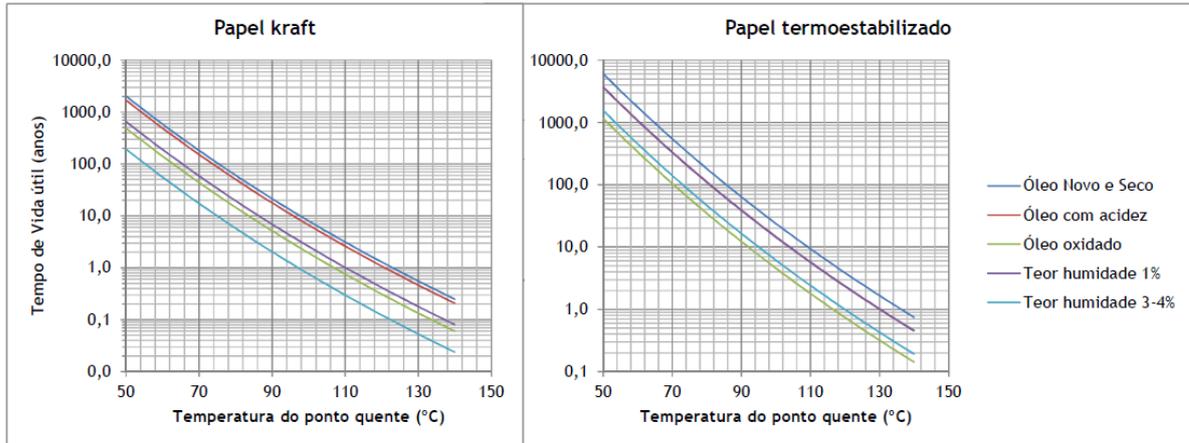
**Tabela 3.7:** Fator ambiental “A” estimado para  $E_a$  de 111kJ/mole

Condições	Papel Kraft: $E_a=111$ kJ/mole	Papel termo-estabilizado $E_a=111$ kJ/mole
Seco e limpo	$(2,0 \pm 0,5) \cdot 10^8$	$(6,7 \pm 1,4) \cdot 10^7$
Óleo com acidez	$(2,4 \pm 0,5) \cdot 10^8$	$(1,1 \pm 0,6) \cdot 10^8$
Óleo oxigenado	$(8,3 \pm 0,5) \cdot 10^8$	$(3,5 \pm 1,4) \cdot 10^8$
1% umidade absoluta	$(6,2 \pm 0,5) \cdot 10^8$	$(1,1 \pm 0,5) \cdot 10^8$
3-4% umidade absoluta	$(21,0 \pm 7,8) \cdot 10^8$	$(2,6 \pm 1,7) \cdot 10^8$

Fonte: [55]

As experiências realizadas demonstram que, além da temperatura, há uma influência muito forte da presença de umidade no papel isolante na velocidade de envelhecimento, bem como a presença de ácidos e oxigênio, embora com menor impacto. Na figura 3.14 apresentam-se as curvas de envelhecimento que resultam da aplicação destes valores e da equação 3.8.

**Figura 3.14:** Curvas de expectativa de vida útil com base nos modelos de variação de GP



Fonte: [35]

A aplicação destes parâmetros e da equação 3.8 para avaliação da taxa de envelhecimento ou para determinar o tempo de vida esperado até atingir um dado  $GP_t$  deve ser realizada com alguma cautela, uma vez que para um reator real há uma variação das condições de temperatura e dos fatores ambientais ao longo do seu ciclo de vida, que vão moldando a velocidade de envelhecimento dessa forma.

### 3.5.2 Análise de compostos furânicos e sua correlação com GP

A degradação térmica dos materiais celulósicos origina a formação de compostos furânicos que podem ser detectados no óleo isolante através de método de detecção por cromatografia líquida, de acordo com a norma CEI 61198.

O composto mais abundante é o 2-Furfural (2FAL), mas os compostos 2-Acetilfurano (2ACF), 5-Metil-2-Furfural (5MEF), 5-Hidroximetil-2-Furfural (5HMF) e Álcool Furfurílico (2FOL) são também encontrados no óleo e papel isolantes. Existem diversos estudos sobre a correlação entre o 2FAL e o GP médio do papel, sendo conhecidas as seguintes equações, retiradas de [30]:

$$\text{Chendong} \quad GP = \frac{1,51 - \log F}{0,0035} \quad (3.10)$$

$$\text{De Pablo} \quad GP = \frac{7100}{8,88 + F} \quad (3.11)$$

$$\text{Pahlavanpour} \quad GP = \frac{800}{(0,186 \times F) + 1} \quad (3.12)$$

$$\text{Shkolnik} \quad GP = \frac{1,17 - \log F}{0,00288} \quad (3.13)$$

onde:

GP - valor do GP estimado;

F - concentração de 2FAL em ppm (mg 2FAL/kg óleo).

Como pode ser visto não é assim tão simples a descoberta de uma fórmula universal para esta relação, uma vez que a concentração de 2FAL realmente presente no óleo, para cada um dos estados de envelhecimento do isolamento sólido, depende de vários parâmetros, nomeadamente: velocidade de formação do 2FAL, velocidade de degradação do 2FAL e o perfil de distribuição do 2FAL entre o óleo e o papel [56]. Por outro lado, é também importante conhecer não só o GP médio, mas sim a sua distribuição ao longo do isolamento dos enrolamentos, especialmente nos pontos mais solicitados termicamente.

Mesmo sem fixar uma correlação com o GP, este método dá informação inconfundível sobre a presença de fenómeno de degradação do papel, sendo um processo simples de implementar, não intrusivo, e que permite um acompanhamento periódico da evolução e análise de tendências para cada reator.

### 3.5.3 Medição direta do GP em amostras coletadas

Em certas condições é possível colher amostras de papel isolante para determinação direta do GP em laboratório, de acordo com método IEC 60450 [30]. As seguintes regras básicas deverão ser consideradas:

- O ponto de amostragem deve constituir uma boa referência, ou seja, o local sujeito ao maior desgaste térmico possível e temperaturas mais elevadas.
- Deve ser garantida a possibilidade de reparar o isolamento da zona afetada pela amostragem, devendo a coleta ser realizada cuidadosamente por pessoa especializada.
- O ponto selecionado deve estar acessível e permitir a realização segura da coleta.

A medição do GP real em amostra de papel do reator tem como objetivo complementar o diagnóstico prévio baseado em métodos indiretos (análise de compostos furânicos), de forma a suportar processos de decisão sobre a viabilidade econômica de reinvestimentos em reatores que já apresentem uma degradação significativa, através da estimativa da vida útil restante do papel isolante (relativa às amostras retiradas).

Assim, assumindo um GP inicial,  $GP_0$ , com base nos valores típicos para reatores novos (1000 a 1200) e tendo definido o critério de fim de vida útil baseado no GP, ou seja,  $GP_{FVU}$ , com valores típicos de 100 a 200, pode-se estimar a vida útil restante do papel isolante como:

$$Vida\ útil\ restante_i\ (\%) = \left(1 - \frac{GP_0 - GP_i}{GP_0 - GP_{FVU}}\right) \cdot 100 \quad (3.14)$$

### 3.6 Avaliação e controle da umidade

A umidade no isolamento influencia a vida útil do reator de diversas formas: aceleração do envelhecimento dos materiais isolantes, aumento das perdas, redução de propriedades dielétricas e risco de formação e liberação de bolhas a elevadas temperaturas, podendo provocar descarga capaz de atravessar regiões de elevado stress dielétrico [57].

O método tradicional de avaliação da umidade do reator baseia-se na determinação do teor de água no óleo (em mg/kg) a uma determinada temperatura (superior a 20 °C), na sua posterior correção para 20 °C e avaliação com base nos limites recomendados na norma IEC 60422 [34].

A classificação do reator quanto ao seu grau de umidade é, no entanto, baseada na estimativa do teor de água presente no seu isolamento sólido (papel).

#### 3.6.1 Avaliação da umidade no papel aplicando diagramas de equilíbrio

Definindo a umidade em termos de saturação relativa (RS) pode-se definir a seguinte condição de equilíbrio que permite estimar o teor de umidade no papel a partir da medição da umidade no óleo:

$$RS_{\text{óleo}} = RS_{\text{papel}} \quad (3.15)$$

$$RS = \frac{H}{H_s} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

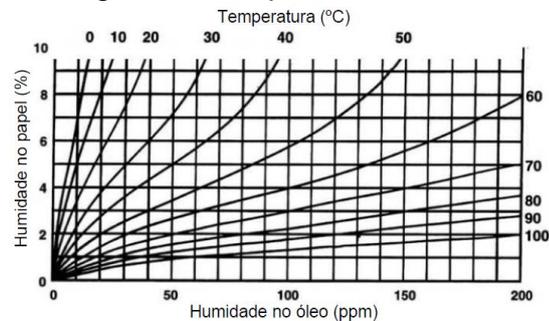
onde:

H - teor de água;

HS - teor de água de saturação do respectivo meio (papel ou óleo).

Quando verificada a condição de equilíbrio, o valor do teor de umidade no papel (em %) pode ser estimado a partir dos respectivos diagramas de equilíbrio, referidos em várias publicações - [39], [30] e [57] - e demonstrado na figura 3.15.

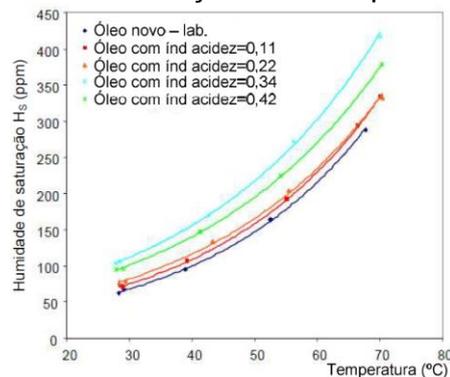
**Figura 3.15:** Diagrama de equilíbrio de umidade papel-óleo



Fonte: [30]

Este diagrama pressupõe uma única curva de variação da saturação relativa do óleo com a temperatura. No entanto, tal como descrito em [57], verifica-se que o tipo de óleo e o nível do seu envelhecimento também podem alterar significativamente o modo como o valor da saturação relativa do óleo varia com a temperatura, como se pode observar na figura 3.16. Deve-se atentar para este fato quando se pretende determinar um valor de RS a partir do teor de água H para uma dada temperatura.

**Figura 3.16:** Umidade de saturação versus tipo de óleo e temperatura



Fonte: [57]

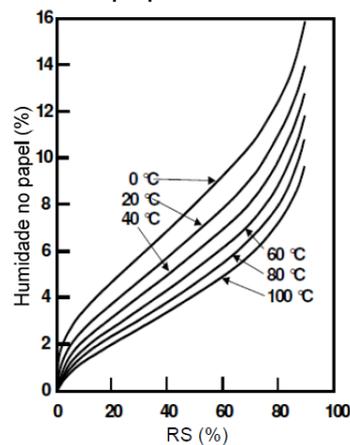
A temperatura tem um papel fundamental no equilíbrio da umidade entre papel e óleo isolantes. A solubilidade da água no óleo aumenta com a temperatura, enquanto que decresce a capacidade de adsorção<sup>7</sup> de água da celulose. Assim, o processo de equilíbrio baseado na equação 3.15, força as moléculas de água a migrar da celulose para o óleo. Para uma diminuição da temperatura ocorre o

<sup>7</sup> Adsorção - a adesão de moléculas de um fluido (o adsorvido) a uma superfície sólida (o adsorvente)

processo inverso, absorvendo novamente o papel parte das moléculas de água presentes no óleo.

Estudos recentes recomendam que para uma avaliação mais correta da umidade do papel a partir de diagramas de equilíbrio, seja utilizada a medida direta da RS do óleo através de sensores específicos e que seja previamente garantido um regime de temperatura de funcionamento constante, superior a 50 °C, durante algumas horas [57]. A partir do valor de RS e da temperatura, pode então ser estimada a umidade no papel a partir do diagrama da figura 3.17.

**Figura 3.17:** Relação da umidade no papel com a saturação relativa e a temperatura



Fonte: [30]

A classificação do nível de umidade a partir dos valores de RS, segundo [34], apresenta-se na tabela 3.8:

**Tabela 3.8:** Critérios para interpretar resultados da medição em saturação relativa do óleo

RS <sub>óleo</sub> (%)	Estado
0 – 5	Isolamento seco
6 – 20	Moderadamente úmido
21 – 30	Isolamento úmido
> 30	Extremamente úmido

Fonte: [35]

Em termos de teor de umidade no papel, pode-se classificar o reator como bom ou seco para valores de 0,5% a 1%; um nível razoável para valores de 1% a 2%; e acima desses valores, classifica-se o reator com o isolamento úmido ou extremamente úmido.

Como limitações associadas a este método devem-se considerar:

- Dificuldade em garantir condições de equilíbrio, uma vez que as variações de temperatura são frequentes.

- Necessidade de adequar o diagrama a utilizar às características do papel/óleo.
- Variação significativa da temperatura ao longo das várias regiões do papel isolante, originando diferentes valores de umidade assim determinados.
- Pequenos erros associados ao processo de amostragem, ensaio ou aplicação de diagramas podem originar uma grande incerteza no valor final.

### 3.6.2 Avaliação da umidade no papel aplicando métodos de ensaios elétricos

Alguns métodos de ensaios especiais para diagnóstico do estado dos isolantes e avaliação do teor de umidade, designados genericamente por métodos de “resposta dielétrica”, têm ganhado relevância nos últimos anos. As três técnicas disponíveis atualmente são:

- Medição da tensão de reabsorção (RVM).
- Medição de correntes de polarização e despolarização no domínio do tempo (PDC).
- Medição da capacidade e fator de dissipação dielétrica e da sua variação com a frequência (FDS).

O método RVM baseia-se na medição da tensão de reabsorção do isolamento após aplicação de uma tensão DC de carga durante certo tempo e posterior descarga por curto-circuito, para várias constantes de tempo. A sua interpretação é feita a partir da verificação da constante de tempo dominante e comparação com padrões de referência e evolução de tendências. Não permite uma quantificação do valor da umidade no papel.

Com os métodos PDC e FDS, a avaliação no domínio do tempo ou da frequência, pode-se identificar independentemente o efeito das variáveis que influenciam a resposta dielétrica: umidade no papel, efeito da condutividade do óleo, geometria dos isolamentos. Em alguns casos já existem soluções com software de modelização de resultados que permitem estimar quantitativamente o valor da umidade no papel com base nestes ensaios, mediante a introdução de algumas informações relativas ao reator (temperatura, condutividade do óleo, geometria de enrolamentos). Atualmente, os resultados obtidos com estes métodos são considerados credíveis [57], embora não estejam abrangidos por normas próprias. Estes dois últimos métodos, PDC e FDS, serão melhores descritos no capítulo 4 deste trabalho.

## **4 Métodos de detecção de falha**

### **4.1 A manutenção no setor elétrico**

A manutenção do reator tem um impacto fundamental na sua vida útil e confiabilidade. Ao longo da vida útil do equipamento se faz necessária a realização de uma manutenção adequada para manter a sua confiabilidade em níveis aceitáveis durante este período. Nos últimos anos, o surgimento de novas tecnologias possibilitou a redução da necessidade de manutenção, porém devido a longa estimativa de vida útil do equipamento, os mantenedores têm que lidar com uma grande variedade de tecnologias, exigindo níveis e escopos diferentes da manutenção.

O conceito de manutenção até bem pouco tempo era o de restabelecer as condições originais dos equipamentos ou sistemas. Atualmente, segundo Kardec e Nascif (2005) [58], é o de garantir a disponibilidade das funções dos equipamentos e instalações de modo a tender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e com custos adequados.

Pode-se observar, nesta última definição, que o conceito de manutenção passa a ser mais abrangente, sendo esta atividade composta por um conjunto de características complexas e de fundamental importância para o processo produtivo e para a qualidade do produto.

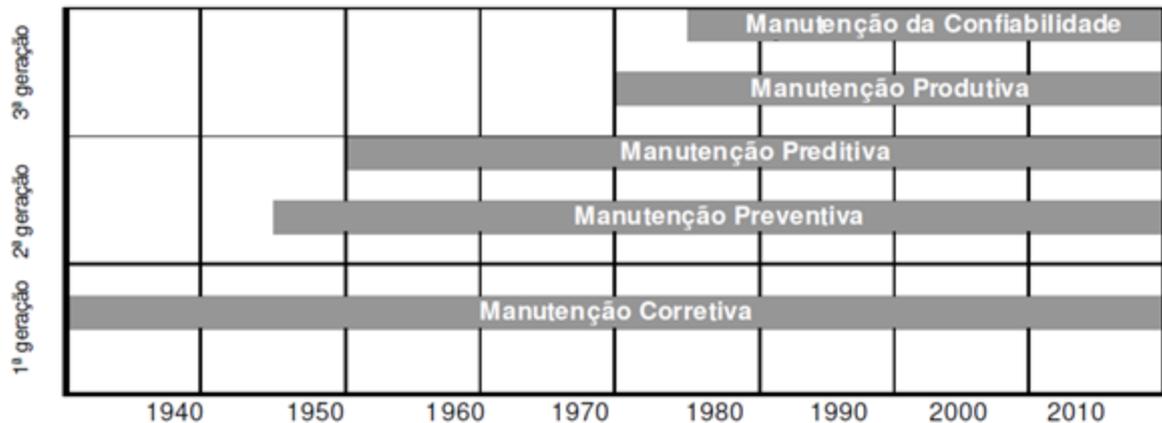
Segundo Lima e Castilho (2006) [59], cronologicamente é possível identificar três gerações de manutenções em equipamentos. A primeira geração num período anterior à Segunda Guerra Mundial, onde as máquinas simples e robustas não sofriam uma manutenção sistematizada e sofriam atuação somente após a ocorrência da falha, até porque o volume da produção não era prioritário, caracterizada como manutenção corretiva.

A segunda geração teve início durante a Segunda Guerra Mundial, quando a necessidade de produção em maior escala forçou a modernização das indústrias e obter maior disponibilidade dos equipamentos, a baixo custo, tornou-se o objetivo básico das indústrias. Isto motivou pesquisas e desenvolvimento de técnicas de manutenção preventiva.

A terceira geração da manutenção foi consequência da automação das indústrias, ocorrida na década de 70, quando as técnicas anteriores, utilizadas de

forma isolada, mostraram-se incapazes de atender às exigências dos sistemas automatizados, com equipamentos dimensionados no limite da necessidade e com faixas operacionais mais estreitas. Assim, passa-se para o conceito de gerenciamento da manutenção, onde a eficiência e confiabilidade dos equipamentos são obtidas por uma manutenção centrada na confiabilidade, conforme pode ser visto na figura 4.1.

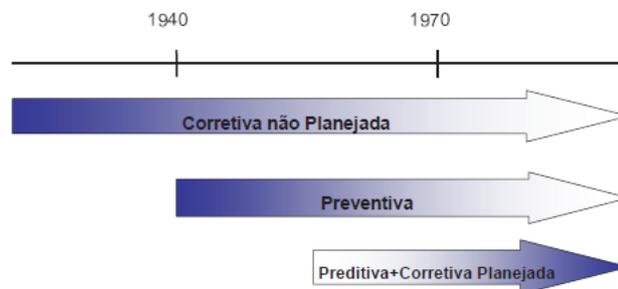
**Figura 4.1:** Evolução da Manutenção



Fonte: [60]

A manutenção no segmento da transmissão de energia elétrica no Brasil passou por fases similares às da manutenção industrial, sendo possível identificar os seus diversos tipos na manutenção praticada no setor. A figura 4.2 ilustra a evolução da manutenção no setor elétrico brasileiro, onde a manutenção corretiva não planejada atualmente é pouco utilizada e vem tendo seu uso reduzido gradativamente. Quando ainda ocorre é em razão de falhas provocadas por agentes fora do controle das concessionárias, como descargas atmosféricas.

**Figura 4.2:** Evolução da manutenção no setor elétrico



Fonte: [41]

Apesar de certas divergências quanto à classificação dos tipos de manutenção, para alguns autores existem seis tipos diferentes de manutenção: Manutenção corretiva não planejada; Manutenção corretiva planejada; Manutenção

preventiva; Manutenção preditiva; Manutenção detectiva e Engenharia de manutenção. Outros autores consideram que há apenas três categorias de manutenção - a Corretiva, a Preventiva e a Preditiva – sendo os demais tipos derivados dessas categorias principais.

#### 4.1.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é o tipo de manutenção mais antiga, sendo empregada em qualquer empresa que possua itens físicos, qualquer que seja o nível de planejamento de manutenção. Segundo a Norma NBR 5462/1994, manutenção corretiva é “a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”. Em suma é toda manutenção com o objetivo de corrigir ou restaurar as condições de funcionamento do equipamento, visando eliminar os defeitos ou as falhas em equipamentos, componentes, módulos ou sistemas, podendo ser realizada de forma programada ou em caráter de emergência, dependendo da gravidade do dano [61] [58].

Assim, a manutenção corretiva programada possui menor custo, é mais rápida, mais segura e de melhor qualidade, enquanto que a manutenção corretiva não programada caracteriza-se pela atuação da manutenção em fato já ocorrido, seja este uma falha ou um desempenho menor que o esperado. Neste último caso, não há tempo para preparação do serviço, sendo que, por isso, normalmente a manutenção corretiva não programada implica altos custos, pois a falha inesperada pode acarretar perdas de fornecimento, perda de qualidade e elevados custos diretos e indiretos de manutenção [58].

#### 4.1.2 Manutenção preventiva

A essência da manutenção preventiva é a substituição de peças ou componentes antes que atinjam a idade em que passam a ter risco de quebra, ou ainda para corrigir desgastes naturais e previsíveis, seguindo uma programação previamente elaborada, baseada em intervalos definidos de tempo. A base científica desta manutenção é o conhecimento estatístico da taxa de defeito das peças, equipamentos ou sistemas ao longo do tempo. A manutenção preventiva ao contrário da manutenção corretiva procura evitar e prevenir antes que a falha efetivamente ocorra e pode ser realizada em intervalos regulares (manutenção

baseada no tempo) ou subordinada a outros critérios de manutenção (manutenção baseada na condição) [61] [58].

A definição da NBR 5462 (1994) [62] para a manutenção preventiva é “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritivos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

#### 4.1.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva pode ser considerada como uma forma evoluída da manutenção preventiva. Com o aperfeiçoamento da tecnologia, tornou-se possível a análise de dados fornecidos pelo monitoramento contínuo ou por amostragem do estado do equipamento para definir se uma manutenção preventiva é necessária ou não [61].

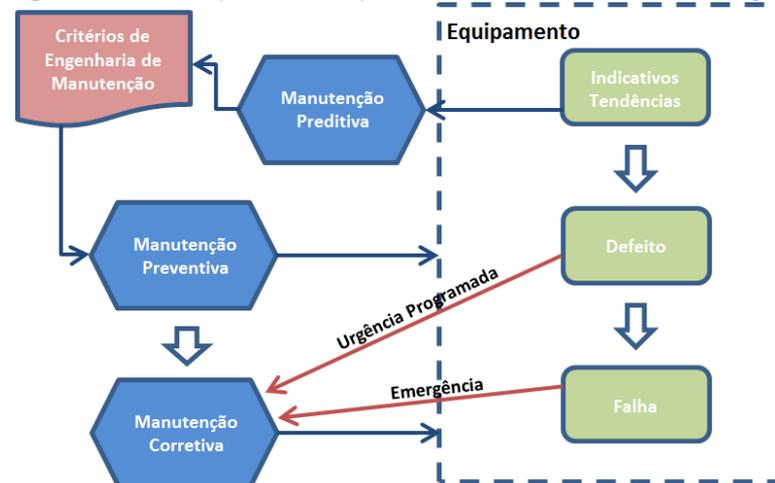
Ela privilegia a disponibilidade, pois as medições e verificações são efetuadas com o equipamento em funcionamento. Seu objetivo é prevenir falhas ou defeitos nos equipamentos por meio de acompanhamento de parâmetros diversos. Quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido, é tomada a decisão de intervenção no equipamento. E, normalmente, esse tipo de acompanhamento permite a preparação prévia do serviço, além de outras decisões e alternativas [58].

Outra condição considerada fundamental para a aplicação da manutenção preditiva é a qualificação da mão-de-obra responsável pela análise e diagnóstico, para que as ações de intervenção tenham qualidade.

As características intrínsecas a esse tipo de manutenção impedem que ela seja empregada de forma generalizada porque exige grande volume de recursos iniciais, tanto humanos quanto materiais, como: mão-de-obra muito qualificada e treinada e a restrição para aplicação em sistemas complexos.

Portanto, as técnicas preditivas permitem a detecção prévia de falhas incipientes e a observação de tendências de defeitos em equipamentos, visando um melhor desempenho e aumento de sua vida útil.

Um esquema simplificado dos procedimentos de manutenção citados anteriormente é mostrado na figura 4.3.

**Figura 4.3:** Esquema de procedimentos de manutenção

Fonte: [63]

Muitos mecanismos da degradação e de falha do equipamento podem ser detectados, corrigidos, evitados ou até mesmo retardados devido a uma manutenção apropriada. Uma estratégia de manutenção deve ser definida para determinar o nível adequado de manutenção, as atividades relacionadas e quando esses trabalhos deverão ser executados. Assim a manutenção de reatores tem um impacto fundamental na sua vida útil e confiabilidade.

## 4.2 Tipos de ensaios em reatores

Nos itens subsequentes serão listados os principais ensaios realizados em reatores, em fábrica e em campo. Os ensaios de fábrica, segundo a NBR 5356-1/2007 [64], podem ser sumarizados em ensaios de rotina (executados na aprovação do equipamento), de tipo (executados na aprovação do projeto do equipamento) e especiais (executados se solicitados pelo comprador).

Os ensaios de campo, de acordo com os padrões da Eletrobras-Eletronorte, podem ser agrupados em ensaios de comissionamento (na instalação do equipamento na subestação), de rotina (para gestão do equipamento na fase de exploração) e especiais (para diagnósticos mais aprofundados).

### 4.2.1 Ensaios de fábrica

#### 4.2.1.1 Ensaios de rotina

- Resistência ôhmica do enrolamento;
- Resistência de isolamento DC;

- Ensaio dielétricos de rotina (de acordo com a tabela 4.1);
- Estanqueidade e resistência à pressão a quente;
- Acessórios (Indicador de nível de óleo / Termômetros de óleo e de enrolamento / Relé de gás / Indicador de fluxo / Válvula de alívio de pressão / Ventilador / Bomba de óleo);
- Óleo isolante (Rigidez dielétrica / Teor de água / Fator de perdas dielétricas ou Fator de dissipação / Tensão interfacial);
- Espessura e aderência.

**Tabela 4.1:** Requisitos para os ensaios dielétricos

Tensão máxima Um kV	Impulso atmosférico		Impulso de manobra (IM)	Tensão induzida de longa duração (CALD)	Tensão induzida de curta duração (CACD)	Tensão suportável à frequência industrial
	Onda plena (IA)	Onda cortada (IAC)				
Um ≤ 72,5	Tipo	Tipo	Não aplicável	Não aplicável	Rotina	Rotina
72,5 < Um < 170	Tipo	Tipo	Não aplicável	Especial	Rotina	Rotina
170 < Um < 300	Tipo	Tipo	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina
Um ≥ 300	Rotina	Rotina	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina

NOTA: Se o ensaio de tensão induzida de curta duração for especificado, o ensaio de impulso de manobra não é necessário. Isto deve estar definido nas especificações.

Fonte: [64]

#### 4.2.1.2 Ensaio de tipo

- Elevação de temperatura (Óleo / Enrolamento);
- Ensaio dielétricos de tipo (de acordo com a tabela 4.1).

#### 4.2.1.3 Ensaio especiais

- Ensaio dielétricos especiais (de acordo com a tabela 4.1);
- Capacitância entre o enrolamento e a terra;
- Medição da impedância de sequencia zero;
- Ensaio de suportabilidade a curto-circuito;
- Ruído;
- Harmônicos na corrente de excitação;
- Potência absorvida pelos motores de bomba de óleo e ventiladores;
- Fator de dissipação da isolação (tg δ);
- Cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo;
- Vácuo interno;

- Verificação de pintura interna e externa;
- Nível de tensão de radiointerferência;
- Resposta em frequência e impedância terminal;
- Grau de polimerização do papel;
- Ponto de orvalho;

#### 4.2.2 Ensaio de campo

##### 4.2.2.1 Ensaio de comissionamento

- Resistência ôhmica do enrolamento;
- Resistência de isolamento DC;
- Fator de potência;
- Resistência ôhmica dos TCs de bucha;
- Resistência de isolamento dos TCs de bucha;
- Relação de transformação dos TCs de bucha;
- Polaridade e Saturação dos TCs de bucha;
- Fator de potência e Capacitância das buchas;
- Óleo isolante (Rigidez dielétrica / Índice de neutralização / Teor de água);
- Cromatografia dos gases dissolvidos no óleo;
- Acessórios (Indicador de nível de óleo / Termômetros de óleo e de enrolamento / Relé de gás / Indicador de fluxo / Válvula de alívio de pressão / Ventilador).

##### 4.2.2.2 Ensaio de rotina

- Termovisão;
- Cromatografia dos gases dissolvidos no óleo;
- Físico-Químico;
- Furfural;
- Vibração e Ruído;
- Acessórios (Indicador de nível de óleo / Termômetros de óleo e de enrolamento / Relé de gás / Indicador de fluxo / Válvula de alívio de pressão / Ventilador / Buchas).
- Fator de potência e Capacitância das buchas;
- Fator de potência e Capacitância do enrolamento.

### 4.2.2.3 Ensaios de especiais

- Resistência ôhmica do enrolamento;
- Resistência de isolamento DC;
- Resposta em frequência e impedância terminal;
- Medição de descargas parciais;
- Ensaio de emissão acústica;
- Análise da resposta do dielétrico.

Observa-se que existe uma infinidade de ensaios e verificações aplicadas aos reatores, em diferentes fases do seu ciclo de vida, para garantir sua integridade e confiabilidade. A seguir serão apresentados os principais ensaios realizados em campo em reatores, baseados em técnicas preditivas e preventivas, e utilizados no setor elétrico para garantir as condições das características funcionais dos reatores.

## 4.3 Ensaios de campo em reatores

### 4.3.1 Ensaios físico-químicos

A técnica de análise físico-química determina a condição de isolamento e o estado de envelhecimento do óleo mineral isolante, a partir de uma coleta da amostra de óleo mineral isolante no reator em serviço, levado para análise em laboratório. Os laboratórios realizam ensaios fundamentais para diagnosticar a qualidade do óleo mineral isolante, com agilidade e precisão necessária, dando subsídios confiáveis às empresas para programar e planejar uma parada para manutenção nos equipamentos. Os resultados obtidos em laboratórios são comparados aos valores pré-estabelecidos em normas. Os valores fora dos limites especificados indicam a necessidade de tratamento, de substituição ou de regeneração do óleo mineral [65], [66].

As principais características físico-químicas, ou ensaios, utilizados como parâmetros de classificação do óleo isolante são:

**Cor:** o óleo isolante novo tradicionalmente é amarelo pálido e límpido, isento de materiais em suspensão. A cor é geralmente aceita como um índice de grau de refino e, segundo a norma ASTM-1500 (*American Society for Testing and Materials*), vai de 0 a 8. À medida que o óleo vai deteriorando ou contaminando, sua cor muda tornando-se mais escura. O número referente à cor, estando elevado representa

envelhecimento, contaminação, deterioração, presença de decomposição por arcos elétricos.

**Rigidez dielétrica:** serve para medir a capacidade de um óleo suportar tensões elétricas, medida pelo gradiente de potencial sob o qual se produz uma descarga. A redução do valor de rigidez dielétrica de um óleo indica a possibilidade de aumento da quantidade de presença de contaminantes como partículas sólidas em suspensão (sujeira, partículas condutoras, partículas de carbono, etc.) e/ou aumento da presença de água dissolvida e/ou água livre em suspensão. O valor mínimo de rigidez dielétrica para reatores de 500 kV é de 45 kV pela NBR 6869 e de 60 kV pela NBR IEC 60156.

**Fator de potência:** mede as perdas dielétricas quando o fluido está sujeito à aplicação de uma fonte elétrica de corrente alternada. Um elevado valor de fator de potência representa a presença de contaminantes ou produtos em deterioração, tais como umidade, carbono ou materiais condutores, sabões metálicos e produtos da oxidação. O valor máximo de fator de potência para reatores de 500 kV é de 0,5% a 25°C e de 15% a 100°C.

**Teor de água:** em sistemas de isolamento elétrico uma baixa quantidade de água é necessária para se ter valores aceitáveis de rigidez dielétrica e fator de dissipação. Um elevado teor de água degrada as propriedades isolantes do óleo e acelera a deterioração química do papel isolante indicando condições de operações indesejáveis. O valor máximo de teor de água para reatores de 500 kV é de 25 ppm.

**Índice de neutralização:** indica a quantidade de material ácido presente no óleo. Em serviço o óleo envelhece naturalmente, assim a acidez e, conseqüentemente o índice de neutralização aumentam, indicando que o óleo está contaminado por vernizes, tintas ou outros materiais. Um elevado nível de acidez, além de aumentar a oxidação do óleo e formar borras, pode também promover a degradação do papel. O índice de neutralização mínima para reatores de 500 kV é de 0,15 mg KOH/g.

**Tensão interfacial:** é a força de tração que se forma entre as moléculas quando existe uma superfície de separação entre dois líquidos. No caso de óleo e água uma redução na tensão interfacial indica, com antecedência, o início da deterioração do óleo. Quando certos contaminantes polares quimicamente ativos estão presentes no óleo, a resistência da película do óleo é reduzida. A presença destes contaminantes é prejudicial, ao atacar o isolamento e interferir no sistema de

resfriamento dos isolamentos internos. A tensão interfacial mínima para reatores de 500 kV é de 25 dinas/cm.

**Densidade:** é a relação de massas de uma determinada substância (OMI) e outra substância do mesmo volume (em geral a água à temperatura de 4°C). Indica uma característica intrínseca do óleo isolante e possui um valor limite na determinação da qualidade de um óleo para fins de aplicações elétricas, sendo da ordem de 0,84 kg/l para OMI parafínico e de 0,87 kg/l para OMI naftênico.

**Contagem de partículas:** a presença de partículas no óleo isolante pode ser proveniente do processo de fabricação do equipamento. No entanto, o desgaste e o envelhecimento do óleo e dos materiais sólidos podem produzir partículas durante a vida em serviço do equipamento e sobreaquecimentos situados acima de 500 °C podem formar partículas de carbono que irão contribuir na contaminação do óleo. Para equipamentos novos acima de 242 kV a contagem de partículas de 2µm deve ser no máximo de 1000 partículas/10ml antes do enchimento e de 1500 partículas/10ml após o enchimento.

**Ensaio de enxofre corrosivo e Teor de DBDS:** os compostos de enxofre são encontrados em muitos materiais usados na fabricação de reatores, incluindo o cobre, papel isolante e o óleo mineral isolante. Após seu refino o óleo ainda pode conter cerca de 0,02 a 1 % de compostos de enxofre. Sabe-se que em temperaturas elevadas de operação pode ocorrer reação de compostos reativos, como o dibenzil dissulfeto (DBDS), com o cobre presente no interior do equipamento formando sulfeto de cobre que se deposita sobre o papel isolante, levando em casos extremos a falhas em equipamentos. O ideal é que o teor de DBDS e enxofre corrosivo sejam indetectáveis na amostra de OMI.

**Ensaio de teor de aditivo passivador:** este aditivo é geralmente encontrado em óleos minerais que contêm DBDS, onde sua adição pode ocorrer na fábrica ou em campo. Ele atua como protetor das superfícies de cobre, impedindo a formação de sulfeto de cobre. Como sua presença interfere no ensaio de enxofre corrosivo e, além disso, é um forte indício da presença de compostos de enxofre corrosivo no óleo isolante, sua realização é indispensável na recepção de novos lotes de óleo mineral isolante. Caso seu valor esteja abaixo de 0,09% o óleo deve ser reinibido.

**Teor de DBPC:** indica a quantidade deste inibidor de oxidação no óleo mineral isolante para suportar a oxidação sob solicitação térmica e na presença de oxigênio e um catalisador de cobre. Esta propriedade depende principalmente do

processo de refino e de como é aplicado a uma determinada matéria-prima. Em óleos para reatores é utilizado principalmente o 2,6 - ditert-butil-paracresol (DBPC) na concentração de 0,3 %.

Algumas das características supracitadas servem não somente como parâmetros de projeto de isolamento, mas também na avaliação e no acompanhamento do óleo em serviço, indicando possível contaminação, estimativas de sua deterioração ou determinação de suas condições funcionais [67].

A tabela 4.2 mostra as características físico-químicas que devem ser avaliadas no óleo mineral isolante de reatores de 500 kV em serviço, e os valores limites para cada uma delas.

**Tabela 4.2:** Valores limites para óleo em serviço – reator

ENSAIO	MÉTODO	VALOR
Índice de neutralização	NBR 14248	min. 0,15 mg KOH/g
Tensão interfacial	ASTM D971	min. 25 dinas/cm
Teor de água	NBR 10710B	max. 25 ppm
Rigidez dielétrica	NBR 6869	min. 45 kV
	NBR IEC 60156	min. 60 kV
Fator de potência 25°C 100°C	NBR 12133	max. 0,5% max. 15%
Teor de DBPC	NBR 12134 <sup>a</sup>	min. 0,09%

Fonte: [67]

#### 4.3.2 Ensaios gascromatográficos

O óleo mineral isolante e a celulose presente na isolação sólida de reatores, quando expostos a temperaturas normais de operação liberam uma grande variedade de gases, no entanto apenas nove desses gases guardam relação com suas possíveis falhas como: óxidos de carbono - monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); hidrocarbonetos - hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) e acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>); e outros gases - nitrogênio (N<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>).

A formação de gases em equipamentos elétricos imersos em óleo mineral isolante pode ocorrer devido ao processo de envelhecimento natural e/ou na ocorrência de uma falha no equipamento, ainda que seja em fase incipiente [68].

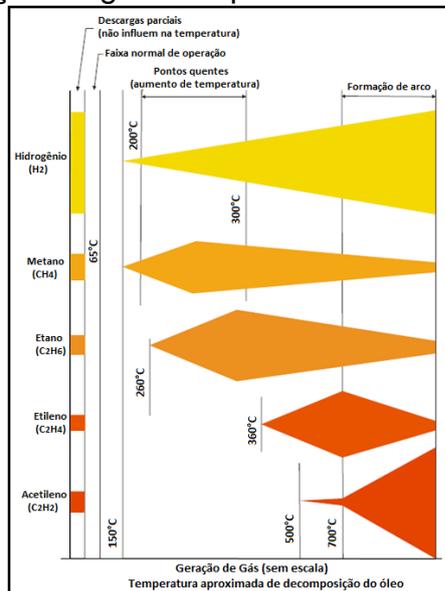
Em situação anormal de operação, devido a falhas localizadas, ou condições de carregamento acima da nominal, a geração de gases ocorre em níveis anormais e em maior quantidade. Dependendo da temperatura atingida, ocorrerá o incremento de determinado gás dissolvido total ou parcialmente no óleo isolante.

Normalmente as causas do surgimento dos gases de falha ou gases combustíveis dissolvidos no óleo são classificadas em três categorias:

- efeito corona ou descargas parciais;
- pirólise ou aquecimento térmico;
- arco elétrico.

Dependendo da energia envolvida, da sua localização, da ocorrência intermitente ou contínua, cada tipo de falha afeta o óleo ou papel de uma forma diferente, gerando quantidades relativas características de gases dissolvidos [69]. No óleo a geração dos gases se comporta conforme a figura 4.4 a seguir:

**Figura 4.4:** Geração de gases dependendo da temperatura do óleo



Fonte: [69]

Os gases dissolvidos no óleo, provenientes de falhas, podem ser classificados em função do tipo de material envolvido e do tipo de falha ocorrida, conforme mostra a tabela 4.3.

**Tabela 4.3:** Classificação dos gases dissolvidos no óleo

<b>1. Corona</b>	
a. Óleo	H <sub>2</sub>
b. Celulose	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>
<b>2. Pirólise</b>	
a. Óleo	
Baixas temperaturas	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Altas temperaturas	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )
b. Celulose	
Baixas temperaturas	CO <sub>2</sub> (CO)
Altas temperaturas	CO (CO <sub>2</sub> )
<b>Arco Elétrico</b>	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )

Fonte: [69]

Assim a análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante (*Dissolved Gas Analysis* - DGA) é uma das mais efetivas técnicas de diagnóstico para determinar previamente defeitos ou falhas em desenvolvimento em equipamentos imersos em óleo isolante, sendo a mais utilizada pelas empresas de energia elétrica para monitorar de forma preditiva as condições de seus equipamentos.

Existem duas formas de execução do ensaio de cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante, a primeira e mais usual, trata-se da análise de maneira *off-line*, onde uma amostra de óleo é extraída do reator e enviada para laboratório para análise, onde são medidas as quantidades (em ppm) de cada variedade de gás presente nesta amostra. A segunda forma é através de um sistema de monitoramento *on-line*, onde um sensor de gases, conectado preferencialmente em uma válvula próxima da circulação de óleo do reator, monitora o reator continuamente.

A avaliação inicial dos dados obtidos é feita comparando os resultados atuais com os resultados anteriores do mesmo equipamento, para verificar a variação, ou a taxa de evolução de cada gás. Após o estudo da taxa de evolução de cada gás, deve ser realizada uma análise mais criteriosa dos dados obtidos, primeiramente levando em conta as relações de gases encontrados, onde são estabelecidas faixas de valores prováveis para a ocorrência de determinados tipos de falha. Em seguida a análise deve levar em conta a formação do gás mais significativo para aquele tipo de falha, também chamado de gás chave [66].

Existem vários métodos para realizar o diagnóstico de falhas incipientes no óleo de reatores, a partir das relações entre os gases encontrados na detecção, sendo que os principais são: a taxa de evolução do gás, o método da IEC 60599, o método de Duval, o método de Rogers, o método da ABNT/NBR 7274, o método de Doernenburg, o método da ANSI/IEEE C57.104, o método do gás chave e o Critério de Laborelec.

#### **4.3.2.1 Diagnóstico a partir da taxa de evolução de gás**

A taxa de evolução da concentração dos gases é considerada a indicação mais significativa no diagnóstico da análise cromatográfica. A evolução ou a indicativa de defeito deve ser encontrada estudando as “famílias” dos reatores de mesmo fabricante e com carregamento semelhante. Como valor de referência, uma

taxa de evolução menor que 10% ao mês é considerada satisfatória, exceto para o gás acetileno, que normalmente não é detectado em reatores operando adequadamente [70].

A taxa de evolução é calculada segundo a equação (4.1):

$$\text{Taxa Evolução (\%)} = \frac{(\text{Teor do gás na última análise} - \text{Teor do gás na penúltima análise}) \times 100}{\text{Teor do gás na penúltima análise} \times \text{Intervalo em meses entre as análises}} \quad (4.1)$$

Resumidamente este método deve ser realizado como a seguir:

- proceder a análises periódicas a intervalos regulares de tempo;
- calcular a taxa de geração do gás - chave da falha, para cada análise;
- comparar a taxa de geração obtida com a anterior.

Os valores considerados internacionalmente como referência para a análise da concentração de gases dissolvidos em óleo de reatores são apresentados na tabela 4.4.

**Tabela 4.4:** Valores internacionalmente considerados de referência (ppm vol/vol)

Gás	Central Electricity Generating Board of Great Britain (CEGB)		Doernenburg	Mitsubishi		
	Transf. Elevadores	Transf. Transmissão		Até 275 kV		500 kV
				≤ 10 MVA	> 10 MVA	
H <sub>2</sub>	240	100	200	400	400	300
CH <sub>4</sub>	160	120	50	200	150	100
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	115	65	15	150	150	50
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	190	30	60	300	200	100
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	11	35	15	Traços	Traços	Traços
CO	580	350	1000	300	300	200
CO <sub>2</sub>	-	-	11000	-	-	-

Fonte: [71]

Os valores da análise no início da operação do reator servirão de valores de referência iniciais, com os quais são comparados os valores obtidos nas análises posteriores, juntamente com os valores de referência aceitos internacionalmente.

#### 4.3.2.2 Método ANSI / IEEE C57.104

Nesse método são consideradas para análise diversas relações entre os principais gases dissolvidos. Conforme essas relações, diagnósticos são propostos, conforme mostra a tabela 4.5.

**Tabela 4.5:** Diagnósticos propostos pela ANSI/IEEE C57.104

Diagnóstico indicado	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$
Condições normais	$> 0,1$ $< 1$	$< 1$	$< 1$	$< 0,5$
Presença de descargas parciais	$\leq 0,1$	$< 1$	$< 1$	$< 0,5$
Descargas parciais com trilhamentos	$\leq 0,1$	$< 1$	$< 1$	$\geq 0,5$ $< 3$
Descargas parciais continuamente	$> 0,1$ $< 1$	$< 1$	$\geq 3$	$\geq 3$
Arcos internos com potência	$> 0,1$ $< 1$	$< 1$	$\leq 1 < 3$ ou $\geq 3$	$\geq 0,5 < 3$ ou $\geq 3$
Arcos internos sem potência	$> 0,1$ $< 1$	$< 1$	$< 1$	$\geq 0,5 < 3$
Pequeno aquecimento interno $< 150\text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 1 < 3$ ou $\geq 3$	$< 1$	$< 1$	$< 0,5$
Sobreaquecimento, $150\text{ }^\circ\text{C} < T < 200\text{ }^\circ\text{C}$	$\leq 1 < 3$ ou $\geq 3$	$\geq 1$	$< 1$	$< 0,5$
Sobreaquecimento, $200\text{ }^\circ\text{C} < T < 300\text{ }^\circ\text{C}$	$> 0,1$ $< 1$	$\geq 1$	$< 1$	$< 0,5$
Sobreaquecimento generalizado dos condutores	$> 0,1$ $< 1$	$< 1$	$\geq 1$ $< 3$	$< 0,5$
Corrente circulante pelo enrolamento	$\geq 1$ $< 3$	$< 1$	$\geq 1$ $< 3$	$< 0,5$
Corrente circulante pelo núcleo e no tanque	$\geq 1$ $< 3$	$> 1$	$\geq 3$	$< 0,5$

Fonte: [77]

#### 4.3.2.3 Método de Duval

O método de Duval apenas analisa a concentração percentual relativa dos gases acetileno ( $C_2H_2$ ), etileno ( $C_2H_4$ ) e metano ( $CH_4$ ). É baseado na visualização da localização da concentração percentual em um mapa triangular, figura 4.5. As coordenadas são estabelecidas pela relação percentual de cada um dos gases em relação ao total de gases gerados. Permite identificar três falhas de origem elétrica e três falhas de origem térmica.

As coordenadas são definidas pelas seguintes equações [72]:

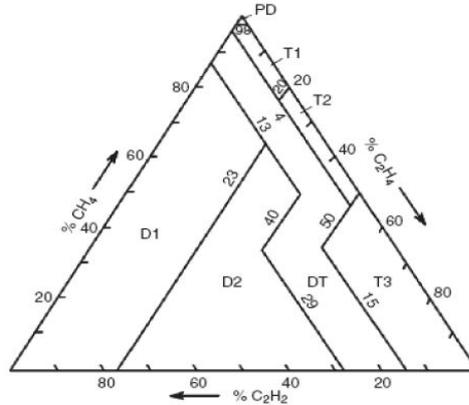
$$\%C_2H_2 = \frac{100x}{x+y+z} \quad (4.2)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100y}{x+y+z} \quad (4.3)$$

$$\%CH_4 = \frac{100z}{x+y+z} \quad (4.4)$$

onde:  $x = C_2H_2$ ,  $y = C_2H_4$ , e  $z = CH_4$ . [microlitros por litro].

**Figura 4.5:** Triângulo de Duval



Fonte: [72]

Os códigos apresentados no triângulo representam uma condição de falha, cuja descrição é a mesma da tabela 4.7. O método prevê a utilização de limites para utilização, conforme a tabela 4.6.

**Tabela 4.6:** Limites por zona

PD	98% CH <sub>4</sub>			
D1	23% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	13% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
D2	23% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	13% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		29% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
T1	4% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	10% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	38% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	
T2	4% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	10% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		
T3	15% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	50% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	10% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	

Fonte: [73]

Visto que neste critério não é indicada nenhuma condição de envelhecimento normal, a implementação cuidadosa deste critério resulta sempre em um diagnóstico de uma falha, seja ela de natureza elétrica ou térmica. Devido a este problema, antes de aplicar este método deve ser verificado se a evolução dos gases está dentro dos limites considerados normais pela empresa [74].

#### 4.3.2.4 Método IEC 60599

A norma IEC 60599 classifica seis tipos de falhas e fornece uma análise do equipamento a partir de modelos característicos de composição de hidrocarbonetos. Esses modelos podem ser transferidos para uma tabela de interpretação, baseada nas relações da tabela 4.7.

**Tabela 4.7:** Interpretação dos gases segundo IEC 60599

Caso	Falha Característica	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	Descargas parciais (ver notas 3 e 4)	NS <sup>1)</sup>	< 0,1	< 0,2
D1	Descargas de baixa energia	> 1	0,1 – 0,5	> 1
D2	Descargas de alta energia	0,6 – 2,5	0,1 – 1	> 2
T1	Falha térmica, t < 300 °C	NS <sup>1)</sup>	> 1, mas NS <sup>1)</sup>	< 1
T2	Falha térmica, 300 °C < t < 700 °C	< 0,1	> 1	1 – 4
T3	Falha térmica, t > 700 °C	< 0,2 <sup>2)</sup>	> 1	> 4

**Nota 1:** Em alguns países, a relação  $C_2H_2/ C_2H_6$  é utilizada, preferencialmente à proporção  $CH_4/ H_2$ . Assim também em alguns países, ligeiras diferenças são utilizadas nos limites.

**Nota 2:** As relações acima são significativas e deverão ser calculadas somente se pelo menos um dos gases está a uma concentração e a uma taxa de crescimento acima dos valores típicos.

**Nota 3:**  $CH_4/ H_2 < 0,2$  para descargas parciais em transformadores para instrumentos.  $CH_4/ H_2 < 0,07$  para descargas parciais em buchas.

**Nota 4:** A decomposição padrão para descargas parciais tem sido relatada como resultado da decomposição da fina camada de óleo entre as lâminas do núcleo quando a temperatura chegar aos 140 °C e acima.

<sup>1)</sup>Valor não significativo

<sup>2)</sup>Um acréscimo significativo no valor de  $C_2H_2$  pode indicar que a temperatura do ponto quente é superior a 1000 °C

Fonte: [73]

#### 4.3.2.5 Método de Rogers

Nesse método são consideradas as seguintes relações:  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_6/CH_4$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  e  $C_2H_2/C_2H_4$ . Na análise são considerados os valores obtidos para as relações gasosas que darão origem a códigos, conforme a tabela 4.8, cuja combinação, conforme a tabela 4.9, determina o diagnóstico da situação de operação encontrada no reator [75].

**Tabela 4.8:** Especificação dos códigos do método Rogers

Relação de Gases	Faixa de variação	Código
$CH_4/H_2$	$\leq 0,1$	5
	$0,1 < CH_4/ H_2 < 1$	0
	$1 \leq CH_4/ H_2 < 3$	1
	$\geq 3$	2
$C_2H_6/CH_4$	< 1	0
	$\geq 1$	1
$C_2H_4/C_2H_6$	< 1	0
	$1 < C_2H_4/C_2H_6 < 3$	1
	$\geq 3$	2
$C_2H_2/C_2H_4$	< 0,5	0
	$0,5 < C_2H_4/C_2H_6 < 3$	1
	$\geq 3$	2

Fonte: [75]

**Tabela 4.9:** Diagnóstico de falhas do método Rogers

Diagnóstico	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Nenhuma falha: Deterioração normal	0	0	0	0
DP com baixa densidade de energia	5	0	0	0
DP com alta densidade de energia, possivelmente com formação de caminho de arco	5	0	0	1
DP de baixa energia: arco sem potência	0	0	0	1
DP de baixa energia: centelhamento contínuo para potencial em flutuação	0	0	1	1
	0	0	1	2
DP de alta energia: arco com potência	0	0	2	1
	0	0	2	2
Sobreaquecimento de condutor isolado	0	0	1	0
Falha térmica baixa T < 150 °C	0	1	0	0
Falha térmica média (100 < T < 200) °C	0	1	0	0
	1	1	0	0
	2	1	0	0
Falha térmica (150 < T < 300) °C, sobreaquecimento do cobre por correntes parasitas	1	0	1	0
Falha térmica (150 < T < 300) °C, maus contatos (formação de carbono pirolítico de corrente no núcleo e/ou tanque	1	0	2	0
	2	0	2	0

Fonte: [75]

#### 4.3.2.6 Método da ABNT / NBR 7274

A norma NBR 7274 desenvolvida para transformadores e reatores, com enrolamentos de cobre, isolados com papel, papelão ou celulose e imersos em óleo isolante mineral, em serviço em sistemas de potência, possui um método baseado nas relações C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e utiliza duas tabelas para realizar o diagnóstico da amostra em análise [76].

**Tabela 4.10:** Diagnóstico de falhas NBR 7274

Caso	Defeito característico	Relação (ver nota a)			Exemplos típicos
		$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$	
1	Sem defeito	0	0	0	Envelhecimento normal
2	Descargas parciais de pequena densidade de energia	0	1	0	Descargas nas bolhas de gás resultantes de impregnação incompleta, de supersaturação ou de alta umidade
3	Descargas parciais de alta densidade de energia	1	1	0	Como acima, porém provocando arvorejamento ou perfuração da isolamento sólida
4	Descargas parciais de energia reduzida (nota c)	1 – 2	0	1 – 2	Centelhamento contínuo no óleo devido a más conexões de diferentes potenciais ou potenciais flutuantes. Ruptura dielétrica do óleo entre materiais sólidos
5	Descargas parciais de alta energia	1	0	2	Descargas de potência. Arco. Ruptura dielétrica do óleo entre enrolamentos, entre espiras ou entre espira e massa, corrente de interrupção no seletor
6	Sobreaquecimento ( $150 < T < 300$ ) °C (nota d)	0	2	0	Sobreaquecimento local do núcleo devido a concentração de fluxo. Pontos quentes de temperatura crescente, desde pequenos pontos no núcleo, sobreaquecimento do cobre devido a correntes de Foucault, maus contatos (formação de carbono por pirólise) até pontos quentes devido a correntes de circulação entre núcleo e carcaça.
7	Sobreaquecimento ( $300 < T < 700$ ) °C	0	2	1	
8	Sobreaquecimento $T > 700$ °C (nota e)	0	2	2	

Fonte: [76]

A tabela 4.10 leva em consideração algumas considerações retiradas de notas da ABNT [76], conforme segue:

- a) O código utilizado para as relações é dado na tabela 4.11, sendo que, para efeito de codificação, as relações com denominador igual a zero, são consideradas iguais a zero:

**Tabela 4.11:** Relações características entre gases

Relação entre gases característicos (R)	Código		
	$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
$0,1 > R$	0	1	0
$0,1 \geq R \geq 1$	1	0	0
$1 \geq R \geq 3$	1	2	1
$3 < R$	2	2	2

Fonte: [76]

- b) Os valores dados para as relações devem ser considerados apenas como típicos;
- c) Na tabela 4.10 a relação  $C_2H_2/C_2H_4$  se eleva de um valor compreendido entre 0,1 e 3 a um valor superior a 3 e a relação  $C_2H_4/C_2H_6$  de um valor compreendido entre 0,1 e 3 a um valor superior a 3 quando a intensidade da descarga aumenta;
- d) Este tipo de falha é indicada normalmente por um aumento da concentração dos gases. A relação  $CH_4/H_2$  é normalmente da ordem de 1; o valor real superior ou inferior a unidade, depende de numerosos fatores tais como, o tipo de sistema de preservação do óleo, a temperatura e a qualidade do óleo;
- e) Um aumento da concentração de  $C_2H_2$  pode indicar que a temperatura do ponto quente é superior a 1000 °C
- f) Na prática podem ocorrer combinações de relações diferentes da tabela 4.10. Para estes casos deve-se considerar a taxa de evolução.

#### 4.3.2.7 Método do gás chave

Este método associa uma determinada falha a um perfil de composição dos gases de falha de acordo com a tabela 4.12.

Tabela 4.12: Perfis típicos de composição

Descrição	Gráfico														
<p><b>Arco</b> Grande quantidade de H<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> são produzidas, com pequenas quantidades de CH<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. CO<sub>2</sub> e CO também podem ser formados caso a falha envolva celulose. O óleo pode ser carbonizado.</p> <p><b>Gás chave - Acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)</b></p>	<table border="1"> <caption>Arco no Óleo</caption> <thead> <tr> <th>Combustível</th> <th>% Combustíveis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>1,6</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>3,3</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table>	Combustível	% Combustíveis	CO	0,01	H <sub>2</sub>	60	CH <sub>4</sub>	5	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,6	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,3	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	30
Combustível	% Combustíveis														
CO	0,01														
H <sub>2</sub>	60														
CH <sub>4</sub>	5														
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,6														
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,3														
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	30														
<p><b>Descargas parciais</b> Descargas elétricas de baixa energia produzem H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, com pequenas quantidades de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Quantidades comparáveis de CO<sub>2</sub> e CO podem resultar de descargas em celulose.</p> <p><b>Gás chave - Hidrogênio (H<sub>2</sub>)</b></p>	<table border="1"> <caption>Descargas Parciais (corona) no óleo</caption> <thead> <tr> <th>Combustível</th> <th>% Combustíveis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>86</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table>	Combustível	% Combustíveis	CO	0,2	H <sub>2</sub>	86	CH <sub>4</sub>	13	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,5	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,2	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,1
Combustível	% Combustíveis														
CO	0,2														
H <sub>2</sub>	86														
CH <sub>4</sub>	13														
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,5														
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,2														
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,1														
<p><b>Celulose superaquecida</b> Grandes quantidades de CO<sub>2</sub> e CO são liberadas da celulose superaquecida. Hidrocarbonetos gasosos, como CH<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, serão formados se a falha envolver uma estrutura impregnada em óleo.</p> <p><b>Gás chave – Monóxido de Carbono (CO)</b></p>	<table border="1"> <caption>Celulose Superaquecida</caption> <thead> <tr> <th>Combustível</th> <th>% Combustíveis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>92</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>6,7</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>1,2</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>0,01</td> </tr> </tbody> </table>	Combustível	% Combustíveis	CO	92	H <sub>2</sub>	6,7	CH <sub>4</sub>	1,2	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>2</sub>	0,01
Combustível	% Combustíveis														
CO	92														
H <sub>2</sub>	6,7														
CH <sub>4</sub>	1,2														
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>2</sub>	0,01														
<p><b>Eletrólise</b> A decomposição de H<sub>2</sub> da água ou a decomposição associada com a ferrugem resulta na formação de grandes quantidades de H<sub>2</sub> com pequenas quantidades de outros gases combustíveis.</p> <p><b>Gás chave – Hidrogênio (H<sub>2</sub>)</b></p>	<table border="1"> <caption>Eletrólise</caption> <thead> <tr> <th>Combustível</th> <th>% Combustíveis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>99,9</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>0,01</td> </tr> </tbody> </table>	Combustível	% Combustíveis	CO	0,01	H <sub>2</sub>	99,9	CH <sub>4</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>2</sub>	0,01
Combustível	% Combustíveis														
CO	0,01														
H <sub>2</sub>	99,9														
CH <sub>4</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>2</sub>	0,01														
<p><b>Óleo superaquecido</b> Os produtos da decomposição incluem C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e CH<sub>4</sub>, juntamente com menores concentrações de H<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Traços C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> podem ser formados se a falha é severa ou se envolver contatos elétricos.</p> <p><b>Gás chave - Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)</b></p>	<table border="1"> <caption>Óleo Superaquecido</caption> <thead> <tr> <th>Combustível</th> <th>% Combustíveis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO</td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>H<sub>2</sub></td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>CH<sub>4</sub></td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Combustível	% Combustíveis	CO	0,01	H <sub>2</sub>	2	CH <sub>4</sub>	16	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	17	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	63	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2
Combustível	% Combustíveis														
CO	0,01														
H <sub>2</sub>	2														
CH <sub>4</sub>	16														
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	17														
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	63														
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2														

Fonte: [76]

#### 4.3.2.8 Critério Laborelec

Este critério considera, além da composição individual de certos gases (H<sub>2</sub>, CO e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), o somatório dos hidrocarbonetos (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) e a relação

do teor de  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  para atribuir níveis de degradação para os diversos equipamentos, conforme é mostrado na tabela 4.13.

**Tabela 4.13:** Tipos de falhas – Laborelec

Concentração (ppm)					Índice
$\text{H}_2$		$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{CO}$	
< 200	< 300			< 400	A
201 – 300	< 300	< 0,15	< 20	-	B1
		0,16 – 1,0	< 20	-	B2
		0,16 – 1,0	> 20	-	B3
< 200	301 – 400	> 0,61	-	< 400	B4
		> 0,61	-	> 400	B5
		< 0,6	> 20	< 400	B6
		< 0,6	> 20	> 400	B7
201 – 300	301 – 400	-	> 20	-	B3
		-	< 20	-	B4
< 200	< 300	-	-	> 400	B9
301 – 600	< 400	< 0,15	-	-	C1
		0,16 – 1,0	< 50	-	C2
		0,16 – 1,0	> 50	-	C3
< 300	401 - 800	> 0,61	-	< 500	C4
		> 0,61	-	> 500	C5
		< 0,6	> 50	< 500	C6
		< 0,6	> 50	> 500	C7
301 – 600	401 - 800	-	> 50	-	C8
		-	< 50	< 500	C4
		-	< 50	> 500	C5
> 600	< 800	< 0,15	-	-	D1
		0,16 – 1,0	50	-	D2
		0,16 – 1,0	> 50	-	D3
< 600	> 801	> 0,61	-	< 700	D4
		> 0,61	-	> 700	D5
		< 0,6	> 50	< 700	D6
		< 0,6	> 50	> 700	D7
> 601	> 801	-	> 100	-	D8
		-	< 100	< 700	D4
		-	< 100	> 700	D5

Nota: Na coluna “Índice” a letra está associada à intensidade do defeito, onde: A: Normal; B: Média; C: Importante; D: Muito Importante. Já o algarismo está associado ao tipo do defeito: 1: Descargas Parciais (Óleo); 2: Centelhamento (Óleo); 3: Centelhamento (Óleo); 4: Térmica (Óleo); 5: Térmica (Óleo + Papel); 6: Térmica (Óleo); 7: Térmica (Óleo + Papel); 8: Arco no Óleo; 9: Térmica (Papel).

Fonte: [70]

### 4.3.2.9 Método de Doernenburg

Baseia-se nas relações  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$  e  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ . Na análise são considerados os valores obtidos para as relações gasosas que, conforme a tabela 4.14, farão a classificação do tipo de falha a que o equipamento está submetido [77].

**Tabela 4.14:** Método de identificação de falha de Doernenburg

Tipos de falha	Relações entre concentrações de gases			
	Relações principais		Relações auxiliares	
	$\text{CH}_4/\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$
Pontos quentes	> 1	< 0,75	> 0,4	< 0,3
Descarga parcial	< 0,1	-	> 0,4	< 0,3
Outros tipos de descarga	0,1 – 1	> 0,75	< 0,4	> 0,3

Fonte: [77]

A tabela 4.14 apresenta os valores de concentração de gases individualmente para a validação da aplicação do método proposto por Doernenburg. Para a ratificação do método, no mínimo um dos gases que compõem as relações principais tem que possuir concentração maior que o dobro do valor da tabela 4.15 e para as relações auxiliares, ao menos um dos gases deve ter uma concentração superior a apresentada na mesma tabela.

**Tabela 4.15:** Concentração dos gases para validação do método de Doernenburg

Gás	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$
Concentração ppm (volume/volume)	200	50	15	60	15

Fonte: [77]

A aplicação dos métodos descritos anteriormente não permite uma interpretação perfeita e completa do status do reator, e a combinação de vários critérios resulta quase sempre em diagnósticos diferentes, assim a aplicação de técnicas de inteligência artificial podem ser utilizadas para tratar essas desvantagens [78].

### 4.3.3 Ensaios de furfuraldeído

Diferente de outros produtos da degradação do papel, como, por exemplo, o hidrogênio e o dióxido de carbono, os furanos são resultantes exclusivamente da quebra das cadeias celulósicas do papel isolante.

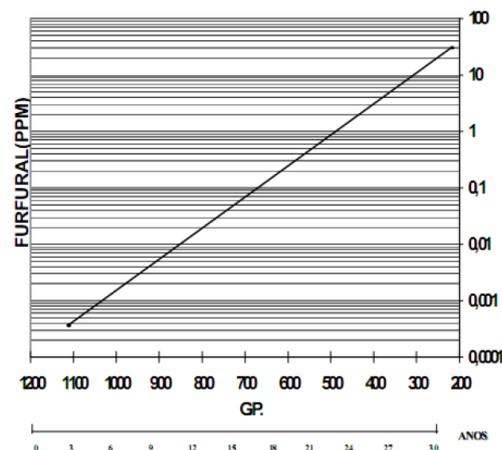
Pode-se encontrar, dissolvidos no óleo isolante, o gás furano ( $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$ ) e seus derivados, denominados genericamente de compostos furânicos, dos quais se

destaca o furfuraldeído (2FAL), por ser o produto mais estável e solúvel no óleo, que são formados nas reações de degradação da celulose, tanto por via da pirólise, como da hidrólise. Assim, a verificação e análise da concentração de furfuraldeído ao longo do tempo possibilitam uma avaliação do processo de envelhecimento do reator.

O método de análise é a medida colorimétrica da cor produzida quando 2FAL reage com Acetato de Anilina, em um comprimento de onda de 520 nm. A cor formada é proporcional à concentração de 2FAL e o cálculo final envolve a comparação com valores de concentrações de padrões previamente plotados em reta, conforme mostra a figura 4.6.

A medição do teor de furfuraldeído permite avaliar a deterioração do papel e conseqüentemente monitorar o estado de conservação do reator, a partir da sua correlação com um valor médio do GP.

**Figura 4.6:** Correlação entre o teor de furfuraldeído e o GP de acordo com Burton



Fonte: [79]

A análise da concentração do teor furfuraldeído permite a seleção de dois tipos distintos de processos de envelhecimento: prematuro e final de vida.

Considera-se um equipamento prematuramente envelhecido o que apresenta um processo de envelhecimento superior à sua idade cronológica, indicada pelo seu início de operação. Um equipamento é considerado prematuramente envelhecido quando o seu teor de furfuraldeído indicar que a sua isolação celulósica apresenta uma idade 20% superior à sua idade cronológica [79].

As equações (4.5) e (4.6) relacionam o GP e o teor de furfural:

$$P. J. Burton \quad GP_{FUR} = -187,5 * \log \left( \frac{FUR}{1000} \right) + 467,5 \quad (4.5)$$

$$X. Chendong \quad GP_{FUR} = -285,71 * \log\left(\frac{FUR}{1000}\right) + 431,43 \quad (4.6)$$

onde:

$GP_{FUR}$  - grau de polimerização em função dos furanos;

FUR - teor furfural.

A partir do grau de polimerização, é possível calcular a “idade furfural” do equipamento, que é o envelhecimento da isolação celulósica, dada pela equação (4.7).

$$Idade_{FUR} = \frac{(-3 * GP_{FUR} + 3600)}{95} \quad (4.7)$$

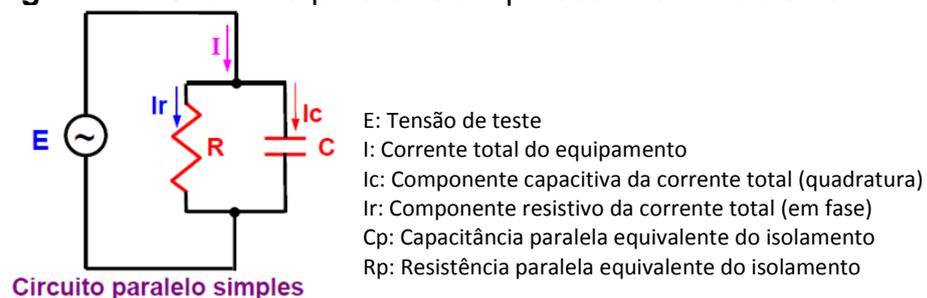
Uma vez obtidas as idades cronológica e furfural, é calculada ainda a idade percentual que indica se o equipamento está acima do limite de 20%. Essa formulação é apresentada na equação (4.8).

$$Idade_{\%} = \frac{Idade_{FUR}}{Idade_{CRON}} * 100 \quad (4.8)$$

#### 4.3.4 Ensaios de fator de potência e capacitância

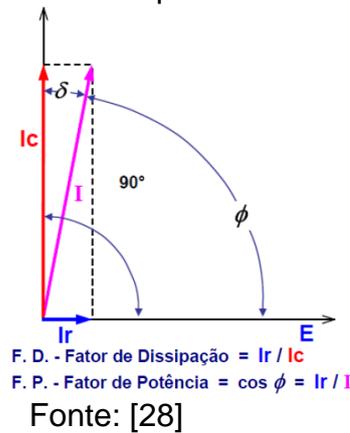
A isolação de um equipamento pode ser representada por um único capacitor combinado com um único resistor, onde o capacitor representa a capacidade do equipamento de armazenar cargas eletricamente separadas, enquanto que o resistor representa a perda dissipada no isolamento quando uma tensão é aplicada, conforme mostra a figura 4.7.

**Figura 4.7:** Circuito equivalente simplificado de um dielétrico



A figura 4.8 mostra o relacionamento entre os vários vetores de corrente e a tensão de teste.

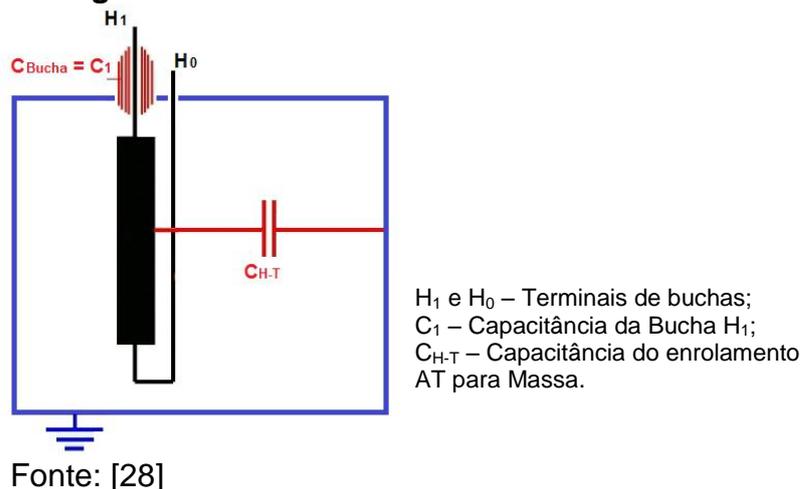
**Figura 4.8:** Componentes vetoriais da tensão de teste e da correntes em um circuito R/C paralelo



O ângulo  $\phi$ , mostrado na figura 4.8, representa o ângulo de fase entre a tensão de teste  $E$  aplicada nos terminais do equipamento dielétrico e a corrente total  $I$  atraída por ela. O cosseno do ângulo  $\phi$  é, por definição, o fator de potência (FP) da isolação de um equipamento elétrico qualquer, operando em corrente alternada.

O enrolamento de alta do reator deve ser isolado tanto do tanque quanto do núcleo do reator, e estes *gaps* de isolamento devem ser verificados periodicamente. Normalmente em um reator monofásico, objeto deste trabalho, as medidas de capacitância e fator de potência para todos os isolamentos são: AT para massa e  $C_1$  da bucha, conforme mostrado na figura 4.9.

**Figura 4.9:** Isolamento de um reator monofásico



O fator de potência é um indicador da qualidade do isolamento óleo-papel desses *gaps*, assim o valor de FP deve ser o menor possível. Um valor elevado pode ocorrer devido ao envelhecimento natural da isolação, que pode ser por efeito térmico ou por contaminações tais como umidade e partículas e, produz perdas na

isolação. Estes fatores também influenciam na capacitância do isolamento do reator. Reatores novos e de boa qualidade têm valores do FP abaixo de 0,5% em 60Hz.

As capacitâncias  $C_{H-T}$  e  $C_1$ , indicadas na figura 4.9, podem sofrer alterações em seus valores devido a descargas elétricas, surtos ou ocorrência de faltas no sistema. Alterações em  $C_{H-T}$  podem indicar deformação da bobina e problemas estruturais tais como deslocamento da bobina e/ou de seu suporte, enquanto que elevações em  $C_1$  podem indicar degradação parcial nas camadas internas da bucha. A tabela 4.16 mostra os critérios utilizados para avaliação da capacitância e fator de potência de reatores e buchas.

**Tabela 4.16:** Critérios de avaliação de buchas a 60 Hz

Capacitância		Avaliação	Fator de Potência
Reator	Bucha		
$\Delta C < 10\%$	$\Delta C < 5\%$	Aceitável	$FP_{med} < 2 \times FP_{ref}$
$10\% < \Delta C < 20\%$	$5\% < \Delta C < 10\%$	Deve ser investigada	$FP_{med} < 3 \times FP_{ref}$
$\Delta C > 20\%$	$\Delta C > 10\%$	Crítica	$FP_{med} > 3 \times FP_{ref}$
Onde: $\Delta C = C_{medida} - C_{ref}$ ; $C_{ref}$ e $FP_{ref}$ valor de placa ou de equipamento novo			

Fonte: [28]

Até bem pouco tempo, a capacitância e o fator de potência só eram medidos na frequência da linha, 50 ou 60 Hz. Atualmente é possível fazer essas medições de isolamento em uma larga faixa de frequência, que varia de 15 Hz a 400 Hz. Assim, as medições podem ser feitas em frequências diferentes da frequência da linha e seus harmônicos e com base neste princípio, as medições podem ser realizadas também na presença de alta interferência eletromagnética.

Como as características elétricas dos materiais isolantes variam com a temperatura, para poder comparar resultados de testes periódicos de fator de potência no mesmo equipamento em diferentes temperaturas, é necessário converter os valores medidos para uma temperatura de referência, neste caso, estabelecida em 20°C. Para isto são utilizados multiplicadores que variam com a temperatura obtida no momento do ensaio, conforme mostra a tabela da figura 4.10.

Figura 4.10: Tabela de multiplicadores para correção do fator de potência a 20°C



**TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS  
AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C**

LIQUID-FILLED TRANSFORMERS, SHUNT REACTORS, AND VOLTAGE REGULATORS														
POWER TRANSFORMERS (Above 500 kVA)			DISTRIBUTION TRANSFORMERS (500 kVA and Below)						PTs/VTs, CTs, and MOs					
Askarel-Filled Trans.	Oil-Filled Transformers		Silicone	Askarel	Oil-Filled		Silicone	TEST TEMPERATURES		HV/EHV Shunt Reactors (Oil-Filled)	Voltage Regulators (Oil-Filled)	Askarel	Oil-Filled	
	Free Breathing and Pre-1955 Conservator Types	Sealed, Gas-blanketed, and Modern Conservator Types			Prior to 1950	Modern		°C	°F				Modern, Rated 220 kV and Above	All Others
—	1.56	.95	—	—	1.56	1.57	—	0	32.0	.95	1.56	—	1.57	1.67
—	1.52	.96	—	—	1.52	1.50	—	2	35.6	.96	1.52	—	1.50	1.61
—	1.48	.98	—	—	1.48	1.44	—	4	39.2	.98	1.48	—	1.44	1.55
—	1.45	.98	—	—	1.45	1.37	—	6	42.8	.98	1.45	—	1.37	1.49
—	1.43	.99	—	—	1.43	1.31	—	8	46.4	.99	1.43	—	1.31	1.43
—	1.38	.99	—	—	1.38	1.25	—	10	50.0	.99	1.38	—	1.25	1.36
—	1.31	1.00	—	—	1.31	1.19	—	12	53.6	1.00	1.31	—	1.19	1.30
—	1.24	1.01	—	—	1.24	1.14	—	14	57.2	1.01	1.24	—	1.14	1.23
—	1.16	1.01	—	—	1.16	1.09	—	16	60.8	1.01	1.16	—	1.09	1.16
—	1.08	1.00	—	—	1.08	1.05	—	18	64.4	1.00	1.08	—	1.05	1.08
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
.90	.91	.99	.96	.90	.91	.96	.96	22	71.6	.99	.91	.90	.96	.93
.81	.83	.98	.92	.81	.83	.92	.92	24	75.2	.98	.83	.81	.92	.86
.72	.76	.97	.88	.72	.76	.88	.88	26	78.8	.97	.76	.72	.88	.80
.64	.70	.96	.84	.64	.70	.84	.84	28	82.4	.96	.70	.64	.84	.74
.56	.63	.95	.80	.56	.63	.80	.80	30	86.0	.95	.63	.56	.80	.69
.51	.58	.94	.76	.51	.58	.76	.76	32	89.6	.94	.58	.51	.76	.65
.46	.53	.93	.73	.46	.53	.73	.73	34	93.2	.93	.53	.46	.73	.60
.42	.49	.91	.70	.42	.49	.70	.70	36	96.8	.91	.49	.42	.70	.56
.39	.45	.90	.67	.39	.45	.67	.67	38	100.4	.90	.45	.39	.67	.52
.35	.42	.89	.65	.35	.42	.65	.65	40	104.0	.89	.42	.35	.65	.48
.33	.38	.87	.62	.33	.38	.62	.62	42	107.6	.87	.38	.33	.62	.45
.30	.36	.86	.59	.30	.36	.59	.59	44	111.2	.86	.36	.30	.59	.42
.28	.33	.84	.56	.28	.33	.56	.56	46	114.8	.84	.33	.28	.56	—
.26	.30	.83	.54	.26	.30	.54	.54	48	118.4	.83	.30	.26	.54	—
.24	.28	.81	.51	.24	.28	.51	.51	50	122.0	.81	.28	.24	.51	—
.22	.26	.79	.49	.22	.26	.49	.49	52	125.6	.79	.26	.22	.49	—
.21	.23	.77	.47	.21	.23	.47	.47	54	129.2	.77	.23	.21	.47	—
.19	.21	.75	.45	.19	.21	.45	.45	56	132.8	.75	.21	.19	.45	—
.18	.19	.72	.43	.18	.19	.43	.43	58	136.4	.72	.19	.18	.43	—
.16	.17	.70	.41	.16	.17	.41	.41	60	140.0	.70	.17	.16	.41	—

TMCF 2090 REV A ©1993 Doble Engineering Company  
All rights reserved

Fonte: [28]

#### 4.3.5 Ensaio de resistência ôhmica

Este ensaio mede a resistência ôhmica do enrolamento do reator. Não existem valores de referência, portanto os resultados devem ser comparados com os valores dos ensaios de fábrica, ou anteriores, não podendo diferir em mais de 5% e podem dar indicações sobre a existência de espiras em curto-circuito, conexões e contatos em más condições de condução elétrica.

A medição deve ser efetuada com corrente contínua e não deve ser a superior a 15% da corrente nominal do enrolamento sob ensaio.

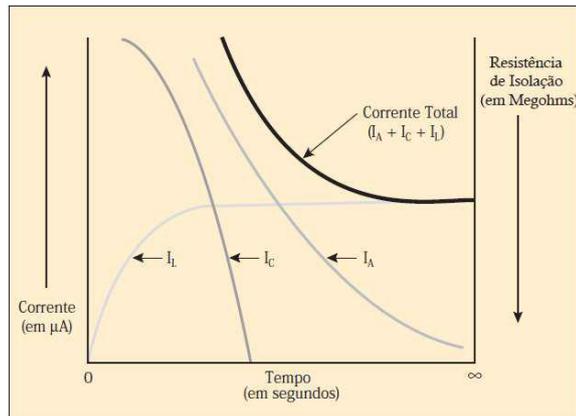
Quando aplicado este ensaio em conjunto com outros, em virtude da polarização do núcleo sugere-se que este seja o último ensaio a ser realizado.

#### 4.3.6 Ensaio de resistência de isolamento DC

O ensaio de resistência de isolamento DC consiste em submeter o isolamento a uma tensão contínua DC, normalmente entre 0,5 e 10 kV, e com isso haverá a circulação de um “pequeno” fluxo de corrente, na ordem de microampères (µA). Esta corrente depende da tensão DC aplicada, da capacitância do isolamento, da resistência total, das perdas superficiais, da umidade e da temperatura do material.

Pode-se afirmar que, para uma mesma tensão, quanto maior a corrente, menor a resistência. A resistência resultante medida neste ensaio é a soma de um valor pequeno de resistência interna do condutor mais a resistência de isolamento, que é dividida em três componentes (sub-correntes) independentes, conforme mostra a figura 4.11.

**Figura 4.11:** Componentes de corrente no ensaio de resistência do isolamento DC



Fonte: [28]

A corrente de fuga condutiva ( $I_L$ ) é uma pequena quantidade de corrente ( $\mu A$ ) que normalmente flui através da isolamento, entre condutores ou de um condutor para a terra. Esta corrente aumenta à medida que a isolamento deteriora-se e torna-se predominante depois que a corrente de absorção some. Por ser bastante estável e dependente de tempo, é a mais importante corrente na medição do ensaio de isolamento DC.

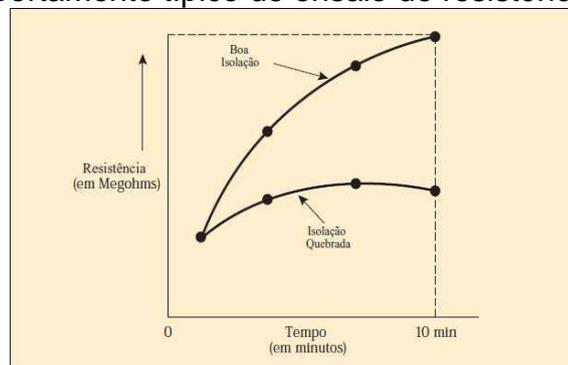
A corrente de fuga de carga capacitiva ( $I_C$ ) flui através da isolamento do condutor devido ao efeito capacitivo existente entre condutores, ou entre condutor e a terra. Esta corrente tem curta duração (somente alguns poucos segundos assim que a voltagem DC é aplicada) e some depois que a isolamento foi carregada eletricamente por completo. Importante ressaltar que em equipamentos de baixa capacitância, a corrente capacitiva pode ser maior do que a corrente de fuga condutiva, porém geralmente desaparece até o momento em que se inicia o registro dos dados. Por causa disto, é importante deixar a leitura se fixar antes de registrá-la. Por outro lado, ao testar equipamentos de alta capacitância, a corrente de fuga de carga capacitiva pode durar muito tempo antes da leitura se estabilizar.

A corrente de fuga de absorção ( $I_A$ ) é a polarização de moléculas no dielétrico. Em equipamentos de baixa capacitância, a corrente é alta pelos primeiros segundos e decresce vagarosamente a quase zero. Ao ensaiar equipamentos de

alta capacitância ou isolamento com teor de umidade elevado e contaminado, não haverá decréscimo na corrente de absorção por um longo período.

A interpretação do ensaio de resistência de isolamento DC é realizada comparando valores de resistência obtidos ao longo do ensaio, que geralmente tem duração de 10 minutos e medições com intervalos que variam entre 30 segundos a 1 minuto, sendo que a interpretação da curva do gráfico, conforme a figura 4.12, irá determinar a condição da isolação. Portanto, um crescimento contínuo na resistência indica boa isolação, em contrapartida, uma curva uniforme ou decrescente indica isolação degradada.

**Figura 4.12:** Comportamento típico de ensaio de resistência do isolamento DC



Fonte: [28]

Além da interpretação das curvas, duas análises muito importantes são obtidas com a divisão do valor encontrado com 10 minutos pelo valor obtido com 1 minuto de ensaio, conhecido como índice de polarização (IP). E com a divisão do valor encontrado com 1 minuto pelo valor obtido com 30 segundos de ensaio, conhecido com índice de absorção (IA). A tabela 4.17 mostra os valores orientativos para o diagnóstico da isolação.

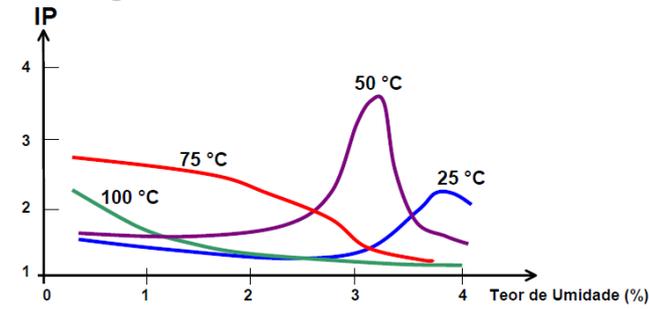
**Tabela 4.17:** Tabela orientativa para diagnóstico da isolação de reatores

IA ( $R_{1\text{min}}/R_{30\text{s}}$ )	IP ( $R_{10\text{min}}/R_{1\text{min}}$ )	Condição da isolação
< 1	< 1	Ruim
1 – 1,4	1 – 2	Duvidoso
1,4 – 1,6	2 – 4	Aceitável
> 1,6	> 4	Boa

Fonte: [28]

A resistência de isolamento DC depende da temperatura da isolação, por isso os valores costumam ser referidos para 75°C. No caso de reatores, considera-se que seu valor cai para a metade a cada 10° de aumento na temperatura.

Estudos recentes utilizam o índice de polarização para estimar o valor da umidade do isolamento medido, conforme mostra a figura 4.13.

**Figura 4.13: IP vs Teor de umidade**

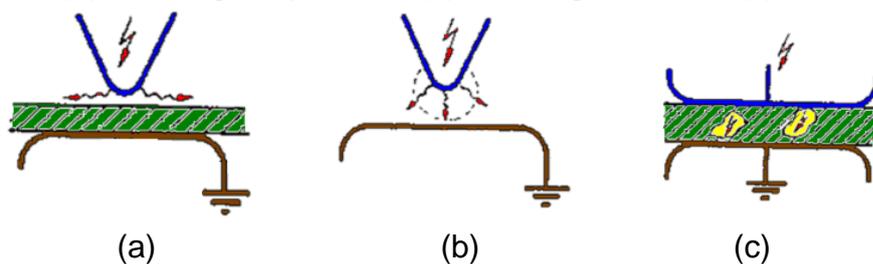
Fonte: [28]

#### 4.3.7 Medição de descargas parciais

A norma IEC 60270 [80] define descargas parciais (DP) como descargas elétricas localizadas na união entre dois condutores, através do isolamento, que pode ou não ocorrer próximo de um condutor. Geralmente, tais descargas aparecem como pulsos que têm a duração menor que 1 microsegundo [μs].

As descargas parciais geralmente ocorrem nas regiões de descontinuidade ou imperfeição do isolamento sujeitas a um campo elétrico, onde o caminho formado pela descarga não une as duas extremidades dessa região de forma completa [81]. A ocorrência de DP depende da intensidade do campo aplicado nas extremidades desse espaço, além do tipo de tensão de teste aplicada (tensão alternada, tensão contínua, sinal transitório, impulso, etc.).

As descargas parciais podem ser classificadas em três categorias de acordo com a sua origem: descarga superficial, descarga externa e descarga interna, conforme figura 4.14.

**Figura 4.14: (a) Descarga superficial; (b) Descarga externa; (c) Descarga interna**

Fonte: [82]

As **descargas superficiais** ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Se a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede um determinado valor crítico o processo de descarga superficial é iniciado. Esse processo é conhecido como trilhamento e pode levar à ruptura completa da isolação.

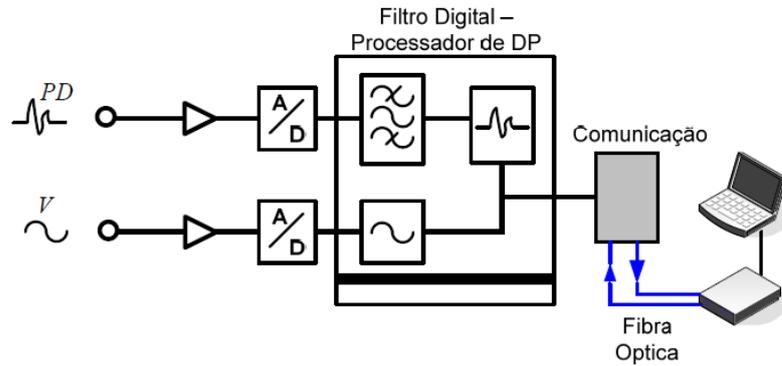
As **descargas externas** também conhecidas como descargas por efeito corona são descargas parciais que ocorrem em ambientes isolados a ar ou gás. E ocorrem a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos, em partes com pequenos raios de curvatura ou em condutores finos conectados a um alto potencial ou a terra. No início do processo de indução da tensão podem aparecer correntes de descarga e brilho característico. O processo químico desencadeado por descargas no gás cria subprodutos que são incorporados ao meio gasoso. E no ar, o corona gera ozônio que causa fissuras na isolação polimérica; os óxidos de nitrogênio junto com o vapor d'água podem corroer metais e depositar material condutor em isoladores e acaba levando ao trilhamento do material.

As **descargas internas** ocorrem nos espaços, geralmente vazios preenchidos com gás, presentes nos materiais sólidos e líquidos usados em sistemas de isolamento. As descargas em isolamentos sólidos podem ocorrer em cavidades capilares de gás em vazios ou trincas. Também podem se estabelecer em defeitos da estrutura molecular. Nos isolantes líquidos, as descargas parciais podem ocorrer em bolhas de gás devido a fenômenos térmicos e elétricos e em vapores de água criados em regiões de alta intensidade de campo elétrico.

Um aumento significativo do nível de DP ou a taxa de crescimento de DP podem fornecer uma indicação prévia para defeitos em evolução. Os pulsos de DP geram ondas eletromagnéticas, sinais acústicos, reações químicas, aquecimento local e sinais óticos. Assim, diferentes técnicas podem ser usadas para detectar estes fenômenos, tais como:

**Medição de descargas parciais utilizando sistemas digitais de medição** que aplicam processamento síncrono de sinais de DP em múltiplos canais, conforme mostra a figura 4.15. Isto torna a análise estatística eficiente, sendo possível discriminar os eventos de descargas parciais de ruídos, e identificar os tipos de falhas e sua localização.

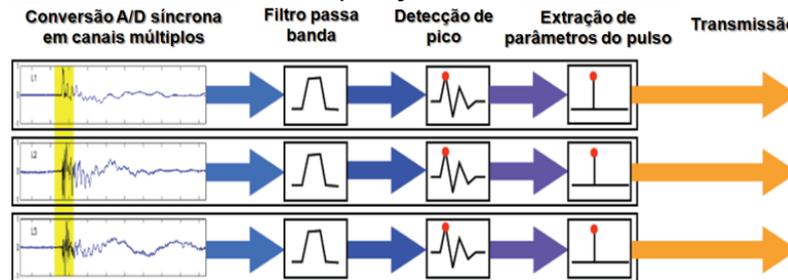
**Figura 4.15:** Representação de esquema microprocessado de medida de descargas parciais



Fonte: [28]

A figura 4.16 apresenta uma visão ilustrativa de um sinal de descargas parciais dentro da unidade do sistema, desde a conversão Analógica/Digital do sinal até a extração dos parâmetros do pulso em um sistema de 3 canais.

**Figura 4.16:** Processamento de dados de DP em canais múltiplos com 3 unidades de aquisição de DP

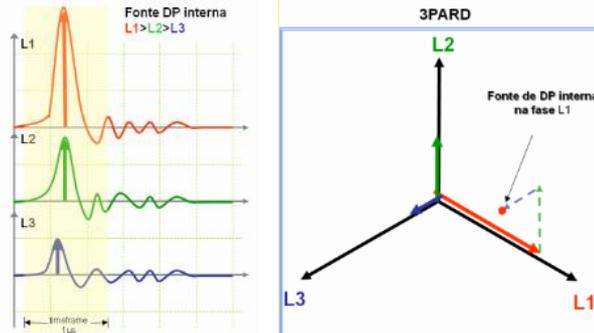


Fonte: [28]

Os parâmetros seleccionados dos pulsos de três diferentes unidades de aquisição podem ser correlacionados e exibidos em diferentes diagramas de avaliação, conforme segue:

- Diagrama de Relação de Amplitude em 3 Fases (*3-Phase-Amplitude-Relation-Diagram – 3PARAD*), conforme mostra a figura 4.17;

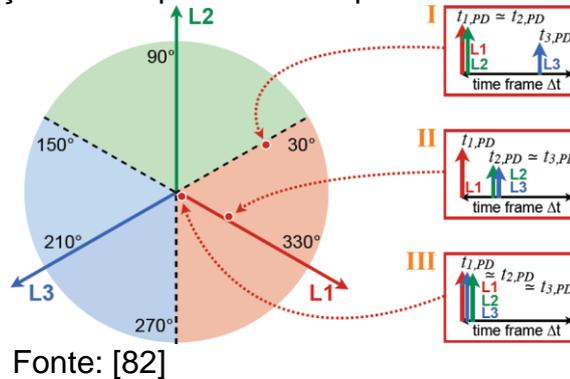
**Figura 4.17:** Criação de 3PARAD usando sinais de tensão de Descargas Parciais



Fonte: [82]

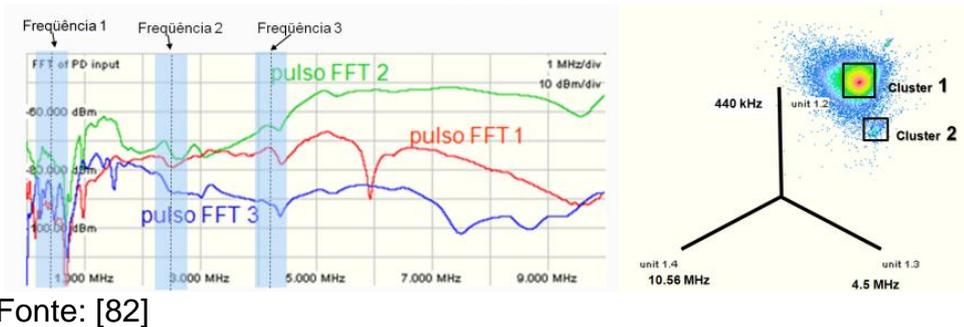
- Diagrama de Relação de Tempo em 3 Fases (*3-Phase-Time-Relation-Diagram – 3PTRD*), conforme mostra a figura 4.18;

**Figura 4.18:** Diferenças de tempo entre os 3 pulsos de DP dentro do segmento L1



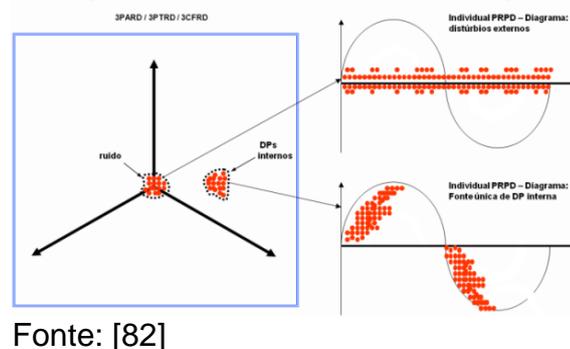
- Diagrama de Relação de Frequências em 3 Canais (*3-Center-Frequency-Relation-Diagram – 3CFRD*), conforme mostra a figura 4.19.

**Figura 4.19:** Representação FFT para pulsos de DP com três filtros de passagem de banda



Cada um desses diagramas separa diferentes origens de tipos de pulsos em agrupamentos. Além disso, cada agrupamento é selecionável para exibir de volta na configuração PRPD (*phase-resolved partial discharge*) clássica, apresentando uma única origem de descargas parciais para observar, conforme mostra a figura 4.20.

**Figura 4.20:** Representação de 3PARD com a separação dos sinais individuais



A **medição de descargas parciais utilizando o método acústico** associa o fato de que um sinal acústico é emitido pela atividade de DP em consequência das

flutuações de pressão causadas pelas descargas elétricas. Por causa da curta duração dos impulsos de DP, as ondas de compressão resultantes têm frequências que variam até a faixa de ultra-sons. O espectro da frequência encontra-se na escala entre diversos Hz e centenas de kHz.

Este método tem uma sensibilidade limitada às falhas de DP nos enrolamentos internos, e é sensível ao ruído que não é gerado pela DP interna. Para melhorar a sensibilidade, este método pode ser combinado com os outros dois métodos de medição de descargas parciais. Os sinais elétricos podem ser usados para provocar o registro de sinais acústicos. E a utilização de filtros reduz a influência de ruídos indesejáveis.

Nos reatores, as ondas mecânicas geradas pela DP se propagam através do óleo, atingindo as paredes do tanque internamente. Do lado externo do tanque são instalados sensores piezoelétricos para a detecção dos sinais acústicos gerados. Usando técnicas de trigonometria, a fonte da emissão acústica pode ser localizada.

Os sensores possuem diversas características que necessitam de uma correta especificação, sendo elas:

- Número de sensores por reator: o número de sensores necessários para a detecção de falhas internas em reatores varia de acordo com o tamanho do reator, quantidade de canais disponíveis e tipo de falha a se detectar. Para a localização mais aproximada de falhas é necessário um número maior de sensores, de forma que o maior volume possível do reator possa ser monitorado;

- Pré-Amplificação: este item é de suma importância, pois apenas os sinais acústicos amplificados são enviados ao hardware de aquisição, eliminando-se os ruídos;

- Frequência de operação: fortemente dependente do tipo de falha que se deseja monitorar, visto que as falhas mecânicas estão associadas às frequências que variam entre 20 kHz e 50 kHz, ao passo que as falhas elétricas variam entre 70 kHz e 200 kHz;

- Frequência de ressonância: este parâmetro especifica a frequência onde o ganho de sinal é máximo. Para um máximo desempenho é necessário que o sensor possua uma frequência de ressonância em sintonia com o fenômeno que se deseja monitorar. Os sensores mais comuns possuem frequência de ressonância de 150 kHz.

A **medição de descargas parciais utilizando-se Ultra Alta Frequência (UHF)** baseia-se no fato de que as descargas parciais no óleo são processos elétricos muito rápidos e irradiam ondas eletromagnéticas com frequências de altíssimo alcance (300-3000 MHz), que são detectadas com sensibilidade de sondas UHF, semelhantes às mostradas na figura 4.21, e podem ser inseridas no reator através de suas válvulas de enchimento ou janelas de inspeção.

**Figura 4.21:** Sonda UHF



Fonte: [28]

A dissociação dos sinais de descargas parciais utilizando-se o método UHF, a partir do interior do tanque de um reator requer que os sensores sejam sensíveis aos sinais de UHF.

Os sinais de UHF têm muito menos sensibilidade do que os sinais acústicos, portanto conforme dito anteriormente pode ser vantajoso combinar os dois métodos. Calculando a média dos sinais acústicos e sincronizando aos impulsos de chegada de UHF, a influência do ruído acústico pode ser reduzida.

A provável localização de DP é conseguida utilizando-se os tempos de curso do sinal acústico combinado com a forma de onda e do tempo de chegada do sinal de UHF.

Combinando o método UHF com sensor acústico, instrumentação e processamento de dados adequados, é apresentada uma série de vantagens, tais como:

- Distinção mais fácil entre os sinais internos e externos de DP (efeito do tanque do reator atuando como "gaiola de Faraday / blindagem" para a detecção de UHF);

- Controle do diagnóstico com um maior entendimento do processo através da comparação com resultados obtidos em medições baseadas na norma IEC 60270;

- Localização geométrica da DP (ou por uma combinação de UHF e método acústico ou a aplicação exclusiva de um dos métodos, dependendo do reator sob teste);

- A dissociação dos sinais de UHF como medição alternativa de DP.

Em comparação com o método da IEC 60270 apresenta a vantagem de utilizar a faixa de frequência UHF para a dissociação entre os sinais de DP, e possibilitar a aplicação do método em reatores com buchas sem tap capacitivo.

#### 4.3.8 Análise de resposta dielétrica - Dirana

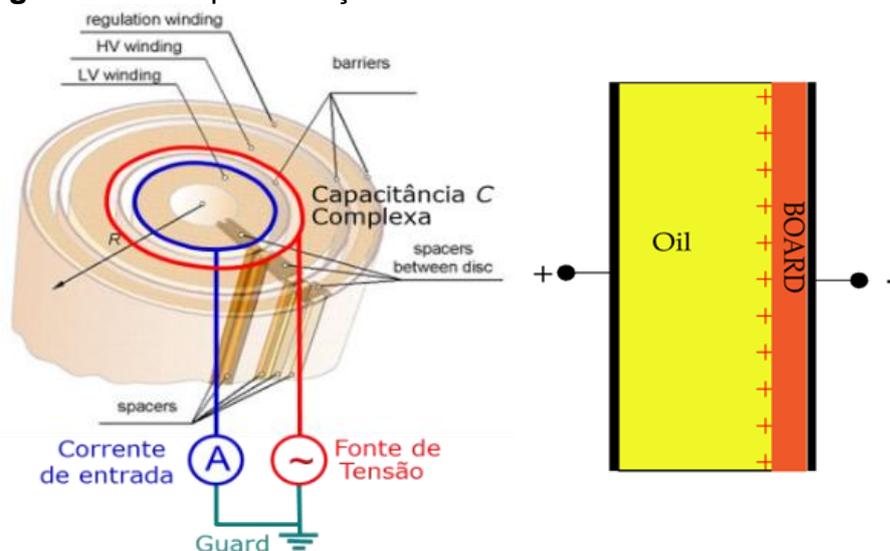
A teoria da análise de resposta dielétrica (*Dielectric Response Analyser - DRA*) não é nova, ela foi primeiramente desenvolvida por KACHLER [19], mas não era utilizada como ferramenta de diagnóstico; somente mais recentemente pesquisas foram direcionadas a tecnologia de diagnóstico.

Segundo [16] existem 3 métodos baseados na DRA: Espectroscopia no domínio da frequência; Espectroscopia no domínio do tempo e Medição da tensão de retorno.

A **espectroscopia no domínio da frequência** (*Frequency Domain Spectroscopy - FDS*) tem como base fundamental a interação entre a matéria e a energia irradiada no momento de aplicação de um sinal. Isto permite identificar a estrutura química de um composto, o que pode ser aplicado para a detecção de um fator de umidade dentro de um reator.

A figura 4.22 mostra o desenho do isolamento de um transformador com os espaçamentos preenchidos com óleo isolante, e sendo aplicada uma tensão de teste no enrolamento de alta tensão, a corrente flui entre a isolação principal para o enrolamento de baixa tensão e volta para o instrumento de teste, onde ela é medida.

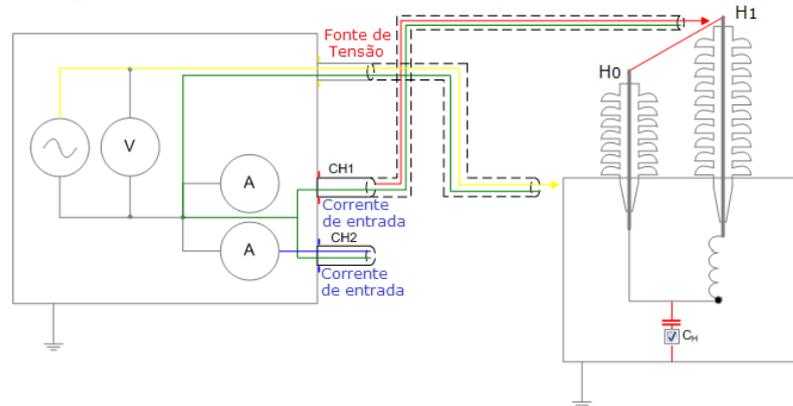
**Figura 4.22:** Representação do isolamento de um transformador



Fonte: [28]

O mesmo princípio mostrado na figura 4.22 pode ser aplicado em reatores, onde a diferença está na aplicação da tensão de teste no enrolamento  $H_0H_1$ , com escoamento da corrente da isolação principal para o tanque do reator, que volta para o instrumento de teste, onde ela é medida, conforme mostra a figura 4.23.

**Figura 4.23:** Esquema de medição para um reator



Fonte: [99]

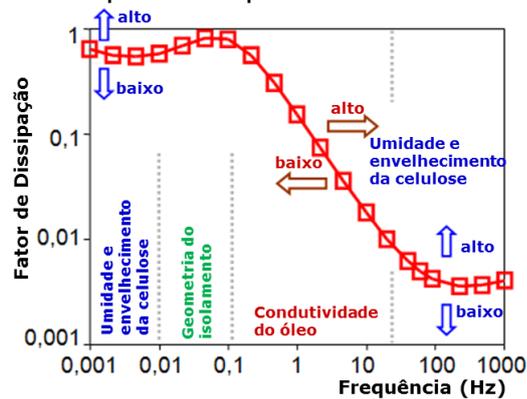
As propriedades medidas são a condutividade da celulose e do óleo, além do efeito de polarização interfacial. A polarização interfacial ocorre quando dois materiais com diferentes condutividade e permissividade (óleo e papel) estão dentro de um dielétrico. Assim os íons do óleo viajam para o eletrodo oposto e formam uma nuvem de carga que pode ser medida externamente como um efeito de polarização.

A polarização e a condutividade podem ser afetadas pela geometria do isolamento e sua composição. Assim, a medida do isolamento de um reator consiste na medida da superposição de vários efeitos, tais como as propriedades do papel e do óleo isolante.

A análise das propriedades dielétricas é dada com a combinação da polarização interfacial no isolamento do óleo e papel no reator combinando suas características.

A resposta dielétrica do isolamento registrada no domínio da frequência é obtida através das medições de fator de potência, com uma larga faixa de frequência, especialmente em baixas frequências, tipicamente de 0,001 Hz a 1000 Hz, como mostra a figura 4.24.

**Figura 4.24:** Espectroscopia do domínio de frequência



Fonte: [28]

O fator de potência com variação da frequência mostra, conforme a figura 4.24, uma curva típica em formato de “S”, que com o aumento do teor de umidade, da temperatura ou com o envelhecimento, aumenta para frequências mais elevadas. A umidade e o envelhecimento da celulose tem influência tanto em baixas quanto em altas frequências. A parte central da curva, que sofre grande variação de valores, reflete a condutividade do óleo. E a parte da elevação da curva registra as condições de geometria do isolamento.

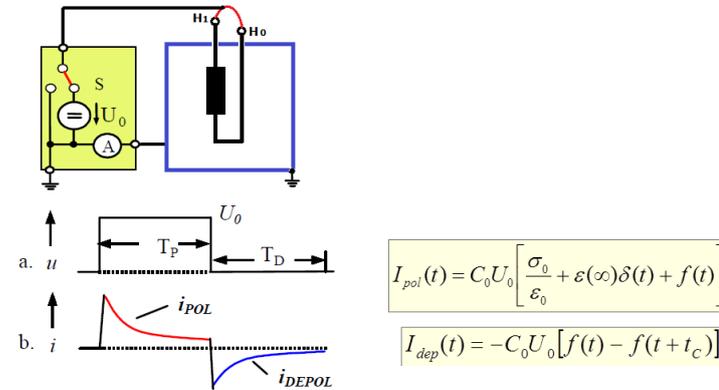
A determinação da umidade é baseada em uma comparação da resposta do dielétrico do reator com a resposta de um dielétrico padrão, que através de um algoritmo apresenta a condição do isolamento, fornecendo o grau de umidade e a condutividade do óleo.

Esta metodologia também pode ser aplicada para avaliação de buchas de alta tensão, onde a medida do fator de potência em baixas frequências permite a detecção da umidade com elevada sensibilidade.

A **espectroscopia no domínio do tempo** é realizada com as medições das correntes de polarização e despolarização (*Polarization and Depolarization Currents - PDC*) em um intervalo de tempo ( $T_P + T_D$ ), conforme mostra a figura 4.25. Para análise de um reator, um degrau de  $100V_{DC}$  é aplicado entre os terminais  $H_1H_0$  e a massa durante um intervalo de tempo  $T_P$ , chamado de tempo de polarização, onde flui uma corrente de carga da capacitância do reator, chamada de corrente de polarização. Decorrido o tempo de polarização  $T_P$ , a chave “S” muda de posição e o dielétrico é curto-circuitado via amperímetro, durante um intervalo de tempo  $T_D$ , chamado de tempo de despolarização. Então, a corrente de descarga, chamada de

corrente de despolarização, salta para um valor negativo, que gradativamente vai em direção do zero.

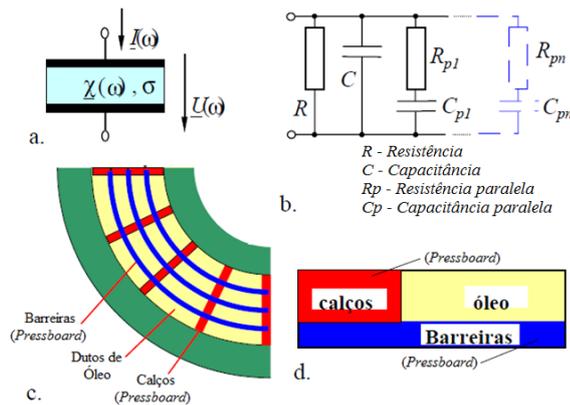
**Figura 4.25:** Correntes de polarização e despolarização de um sistema de isolamento



Fonte: [83]

De acordo com a teoria do dielétrico linear, o modelo expandido apresentado na figura 4.26b pode ser deduzido para descrever um comportamento dielétrico pela função de resposta dielétrica  $f(t)$  no domínio do tempo ou a característica de polarização  $\chi(\omega)$  e condutividade  $\sigma$  no domínio da frequência [22], [12]. A figura 4.26c apresenta o arranjo representativo dos calços, barreiras e canais de óleo no sistema de isolamento principal de reatores. E por modelagem, esse arranjo pode ser simplificado conforme a figura 4.26d.

**Figura 4.26:** Arranjos e modelos de um sistema de isolamento

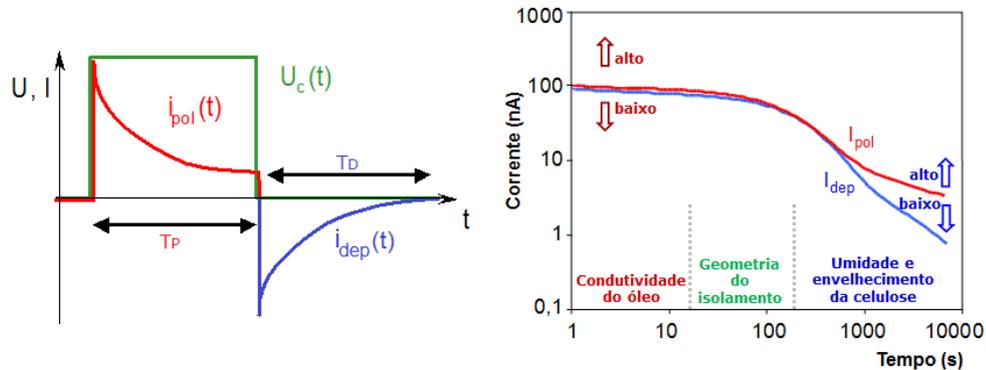


Fonte: [83]

Para condições típicas de medição, a interpretação das correntes no domínio do tempo durante carga e descarga ocorre da seguinte forma: a condição de condutividade do óleo afeta a corrente de polarização, de maneira mais preponderante, na faixa de tempo  $t < 25s$  (tempo curto); a geometria do isolamento é caracterizada na faixa de tempo  $25s < t < 250s$  (tempo médio) e a umidade e

envelhecimento da celulose é refletida na faixa de tempo  $t > 250s$  (tempo longo), conforme mostra a figura 4.27.

**Figura 4.27:** Interpretação das correntes de polarização e despolarização



Fonte: [28]

A **medição da tensão de retorno** (*Recovery Voltage Meter* - RVM) é baseada na aplicação de uma corrente contínua no enrolamento de reatores isolados a óleo e papel, onde devido ao fenômeno da polarização interfacial se verifica que mesmo após a retirada da fonte permanece uma tensão residual, identificada como tensão de retorno. O tempo em que o processo se dá depende da permissividade e resistividade dos materiais que formam o dielétrico, neste caso, óleo e papel.

Basicamente, a medição da tensão de retorno fornece um espectro obtido por ciclos, consistindo em três etapas e um tempo de relaxação ( $T_i = R_i C_i$ ):

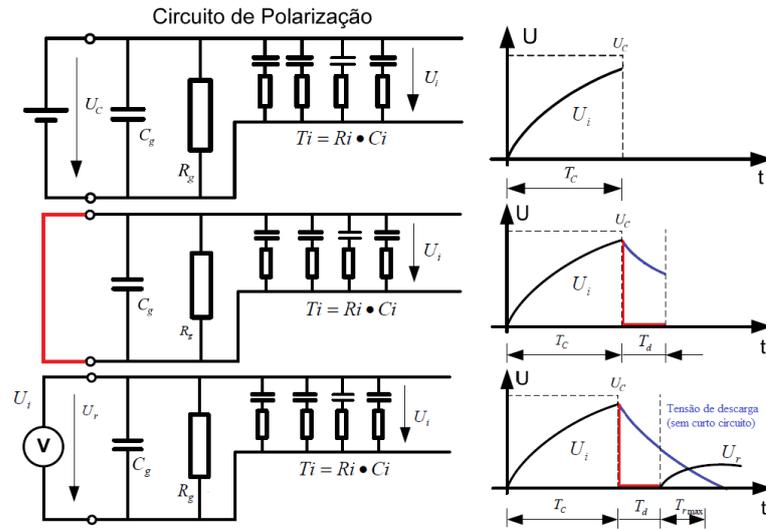
- a aplicação de uma tensão DC por um tempo de carga ( $T_c$ ), no qual se percebe a polarização do dielétrico analisado;

- curto circuito em um tempo de descarga ( $T_d = 1/2 T_c$ ), na razão da metade do tempo de carga, que remove a polarização da isolação para se obter a energia armazenada nos dipolos;

- abertura dos terminais para medida da tensão, obtendo-se então um valor de tensão de retorno ( $U_r$ ) para um dado tempo de carga ( $T_c$ ).

A figura 4.28 mostra todos os ciclos para medição da tensão de retorno nos terminais de um dielétrico.

**Figura 4.28:** Ciclos durante a medição da tensão de retorno

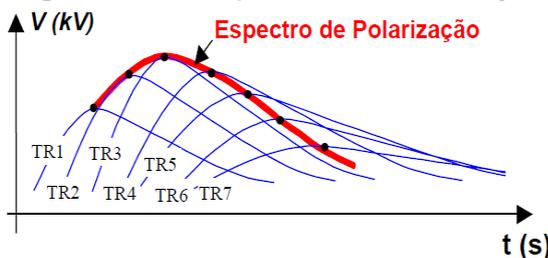


Fonte: [28]

Normalmente o ensaio inicia-se com  $T_c = 0,02$  s, obtendo-se o correspondente  $U_r$ , e repete-se o procedimento para vários tempos de carga cada vez maiores, até um valor máximo de tensão de retorno ( $U_{r_{max}}$ ). A partir daí, tempos de cargas maiores vão gerar valores de tensão de retorno menores que  $U_{r_{max}}$ , até que  $T_c$  atinja 1000 s, quando se encerra o ensaio.

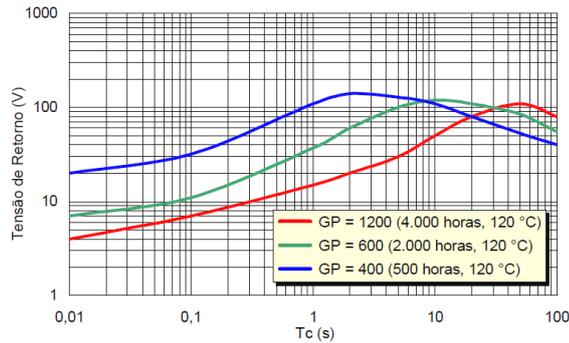
Ao final do ensaio obtém-se uma família de curvas de tensão de retorno, cuja envoltória dos picos gera o chamado espectro de polarização, conforme mostra a figura 4.29.

**Figura 4.29:** Espectro de Polarização



Fonte: [84]

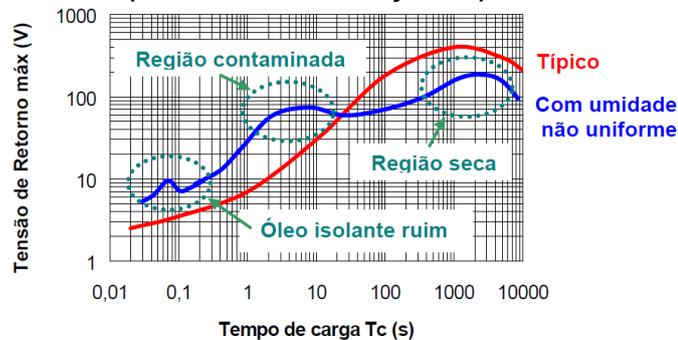
O pico desta envoltória representa uma resposta global dominante para a isolamento e também um determinado teor de umidade, que pode ser obtido num gráfico  $U_r \times T_c$  em escala logarítmica, conforme o mostrado na figura 4.30.

**Figura 4.30:** Tensão de Retorno vs Grau de Polimerização

Fonte: [84]

Pode-se então relacionar o teor de umidade da isolação, com a constante de tempo  $T_c$ , sendo que quanto menor o teor de umidade da isolação, menor o tempo de aplicação de carga, para que se atinja o valor máximo de tensão de retorno  $U_{r_{max}}$ .

O método também permite avaliar a qualidade dos processos de manutenção e recuperação de reatores, onde a isolação fica exposta ao ambiente por tempo prolongado. Quando a superfície isolante é exposta à umidade ambiente aparece um segundo pico no espectro de polarização. E o aparecimento de um pico extra na região mais rápida é indicativo de óleo isolante ruim, conforme mostra a figura 4.31.

**Figura 4.31:** Espectro de Polarização Típico vs Com umidade

Fonte: [84]

Os principais fatores que influenciam a medição de tensão de retorno em ensaios práticos são:

- a temperatura da isolação que deve estar homogênea e manter-se o mais constante possível durante o ensaio, assim para a estabilização da temperatura é necessário aguardar normalmente de 6 a 8 horas após o desligamento do reator e durante o ensaio não pode haver a circulação do óleo forçada por bombas ou a operação dos ventiladores.

- a situação histórica prévia do reator, pois a presença de cargas residuais, deixadas por outros ensaios em DC, no reator antes do ensaio irão influenciar nos resultados obtidos.

- o tempo de duração do ensaio que pode chegar a 10 horas, no caso de equipamentos novos ou com valores de umidade menor que 0,5%, pois com a umidade, a capacitância de polarização aumenta várias vezes, porém a resistência diminui centenas de vezes de modo que o tempo de relaxação ( $T_i$ ) é reduzido sensivelmente, acelerando a resposta deste processo. Em termos práticos, um aumento de 1% no teor de umidade do papel pode acelerar a resposta em mais de 10 vezes.

#### 4.3.9 Análise da resposta em frequência

A análise da resposta em frequência (*Frequency Response Analysis* - FRA) baseia-se na teoria de controle, onde o comportamento de um sistema linear, invariante no tempo, com uma entrada e uma saída estáveis, pode ser descrito pela resposta a um sinal de excitação em uma ampla faixa de frequência, com o objetivo principal de detectar deformações em equipamentos por meio dos efeitos das alterações resultantes no circuito RLC que representa sua estrutura.

O teste de resposta em frequência pode ser realizado antes e depois do transporte do reator; após o reator ter sofrido os efeitos de altas correntes (por exemplo, corrente de falta próxima ao reator); ou se a análise dos gases dissolvidos no reator apresentar fatores alterados (altas temperaturas etc.).

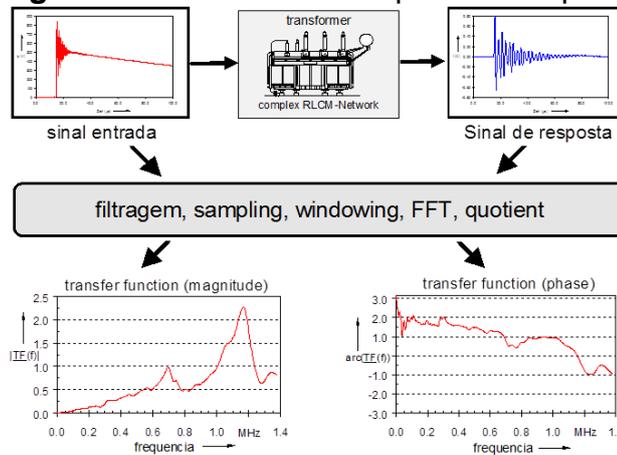
Uma vez realizado o teste, ele pode detectar defeitos como: movimento de núcleo; deformação da bobina - axial e radial; deslocamento do enrolamento; falha no núcleo magnético (laminação curto circuitada); faltas do núcleo para a terra; conexões internas quebradas ou abertas; estruturas quebradas e/ou elementos de fixação soltos; colapso parcial do enrolamento; danos após estresse mecânico provocado por descarga atmosférica ou outros fatores ambientais; espiras curto circuitadas e abertura do enrolamento.

No entanto as medições de FRA também são utilizadas para verificar a qualidade e o estado de reatores novos; melhorar a qualidade do programa de inspeção regular ou manutenção e; eliminar inspeções internas caras e desnecessárias.

Existem duas abordagens para injetar o sinal de excitação necessário para realizar a análise da resposta em frequência, o Método da resposta ao impulso e o Método da resposta por varredura em frequências, sendo este último o mais utilizado nas medições de campo.

O **método da resposta ao impulso (IRM)** consiste na medida indireta de uma resposta de frequência, realizada pela injeção de um sinal de impulso de uma forma particular em um terminal de entrada e medida a resposta no terminal de saída. As medidas, realizadas no domínio do tempo, são transformadas para o domínio de frequência, conforme mostra a figura 4.32.

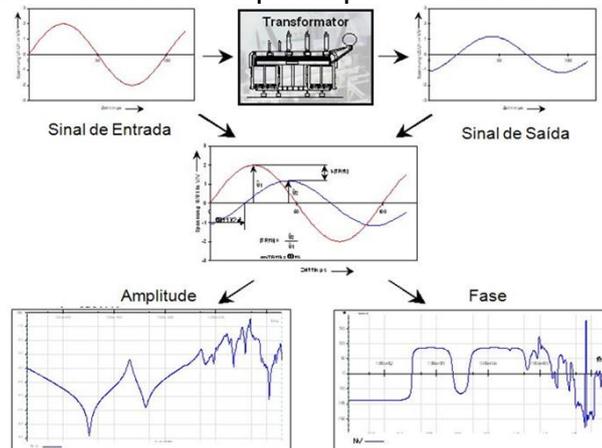
**Figura 4.32: Método da resposta ao impulso**



Fonte: [85]

O **método da resposta por varredura em frequências (Sweep Frequency Response Analysis - SFRA)** consiste na medida direta de uma resposta de frequência através da injeção de um sinal senoidal de frequência variável. Este sinal é injetado em um terminal de entrada e medida a resposta no terminal de saída, conforme mostra a figura 4.33.

**Figura 4.33: Método da resposta por varredura em frequências**



Fonte: [85]

O ensaio mede a impedância e/ou magnitude de tensão do enrolamento de reatores sob uma grande faixa de frequências, geralmente compreendida entre 10 Hz e 20 MHz.

A **impedância** própria de uma bobina, também chamada de impedância terminal consiste na representação gráfica da relação entre o sinal de tensão de entrada e o sinal de corrente de entrada em função da frequência, obtendo-se a Função Impedância  $U_i/I_i(f)$  e Função Admitância  $I_i/U_i(f)$ .

A **magnitude de tensão** do enrolamento, ou função transferência de tensão pode ser representada por sua amplitude e fase de acordo com as equações (4.9) e (4.10) respectivamente.

$$A \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (4.9)$$

$$\varphi \text{ (}^\circ\text{)} = \tan^{-1} \left( \frac{\angle V_{out}}{\angle V_{in}} \right) \quad (4.10)$$

A primeira medida das funções impedância ou transferência de tensão realizada no reator novo e/ou em bom estado fornece uma resposta em frequência de referência, também denominada de “assinatura” do equipamento. Obter esta informação é importante porque é com ela que são comparadas as medições de resposta em frequência realizadas após a ocorrência de eventos no sistema, que podem ter danificado a estrutura interna (núcleo e enrolamento) do reator.

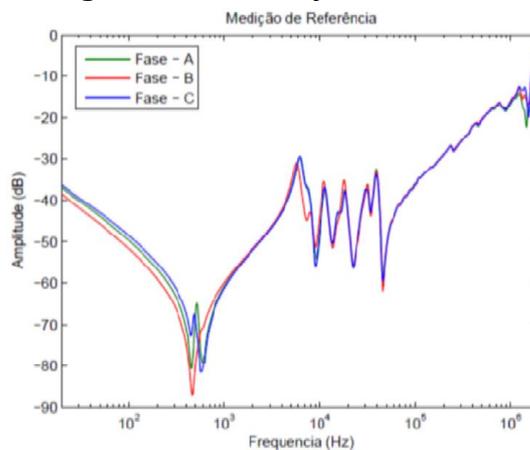
No tocante à comparação entre medições de resposta em frequência, é melhor que sejam usadas medições efetuadas no enrolamento antes e depois do evento, ou seja, comparando a assinatura do reator com a medição após o evento que causou a possível falta. É apropriado que ambas as medições sejam realizadas nas mesmas condições em que foi gerada a assinatura.

Caso isto não seja possível, é aconselhável que sejam realizadas medições entre fases do mesmo reator para uma avaliação mais confiável, para complementar a comparação com as medições de referência. A comparação entre fases é possível em reatores, desde que somente uma das três fases do reator esteja danificada. Devido a diferenças na indutância de magnetização entre as fases de reatores trifásicos, poderão existir diferenças entre diagramas de resposta em frequência nas

baixas frequências, mas em médias e altas frequências, os resultados geralmente são bastante coerentes.

A figura 4.34 ilustra uma medição real de resposta em frequência para as três fases em um reator trifásico de 30 MVar e 230 kV, onde podem ser observadas pequenas diferenças nas médias e altas frequências e diferenças significativas nas baixas frequências, que devem ser consideradas na análise da resposta em frequência entre fases. Para alguns reatores, análises realizadas entre fases podem não fornecer resultados muito satisfatórios, devido diferenças na configuração das ligações no ensaio ou devido aos espaços externos ao enrolamento [86].

**Figura 4.34:** Medição de SFRA



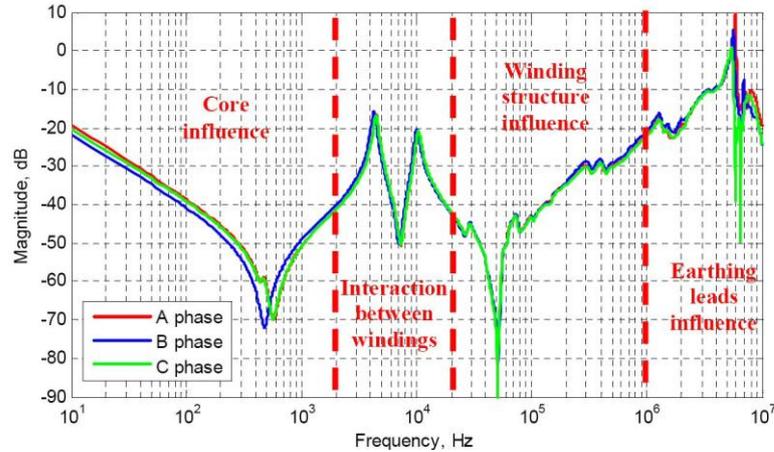
Fonte: [28]

Na ausência de curvas do mesmo enrolamento antes e após o evento, ou de curvas de fases do mesmo reator, a comparação de medições de resposta em frequência pode ser feita entre reatores de mesma família. Um exemplo de utilização da técnica de FRA para esta situação é no caso de investigar danos em bancos de reatores monofásicos. Também para este tipo de comparação, a resposta em baixas frequências pode apresentar grandes diferenças, entretanto, em médias e altas frequências os resultados tendem a ser satisfatórios [86].

A comparação pode ser realizada em três faixas distintas de frequências, conforme mostra a figura 4.35. **Baixa**, < 2 kHz: estão relacionados com ocorrências no núcleo do reator e circuitos magnéticos. A avaliação nesta faixa de frequência tem que levar em consideração o magnetismo residual. **Média**, de 2 kHz a cerca de 1 MHz: a análise tem que levar em conta modificações na geometria, abertura e curtos circuitos nos enrolamentos. **Altas**, > 1 MHz: a análise nesta faixa está

relacionada com alterações das conexões, buchas, conexões do enrolamento e outros.

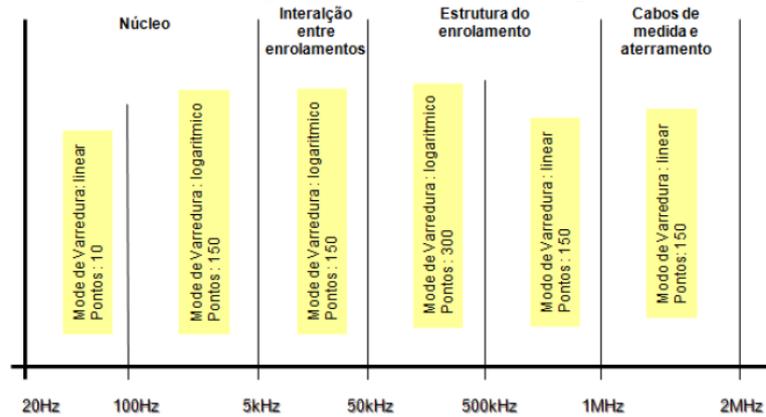
**Figura 4.35:** Interpretação das faixas de frequências



Fonte: [85]

Os ajustes do ensaio, tais como o número de pontos a serem medidos e a distribuição desses pontos pela escala de frequência, terão impacto direto na formação da assinatura e mais tarde na análise da medida. A figura 4.36 mostra uma possível distribuição das faixas de frequência e a quantidade de pontos para cada uma.

**Figura 4.36:** Distribuição da medida no range de frequências



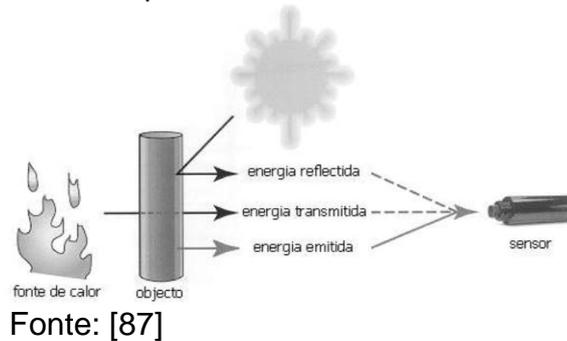
Fonte: [85]

#### 4.3.10 Ensaio de termografia

A termografia é uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva que tem como base a detecção da radiação infravermelha emitida naturalmente pelos corpos com intensidade proporcional a sua temperatura. Através desta técnica é possível identificar regiões, ou pontos, onde a temperatura está alterada com relação a um padrão pré-estabelecido. É baseada na medida da radiação eletromagnética emitida por um corpo a uma temperatura acima do zero absoluto.

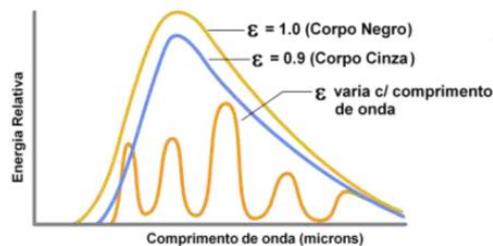
Os equipamentos que permitem a leitura da radiação eletromagnética são o radiômetro e o termovisor, ambos recebem uma distribuição da emissão de radiação do corpo aferido, ou seja, energia emitida + energia transmitida + energia refletida, conforme mostra a figura 4.37.

**Figura 4.37:** Esquema de direcionamento da radiação



Um cuidado a se tomar ao medir objetos com o radiômetro ou o termovisor, é de não visar o objeto em ângulos superiores a 60°, pois estes sofrem redução de emissividade ( $\epsilon$ ). A emissividade, cujo espectro é mostrado na figura 4.38, é um dos fatores que influenciam a emissão de radiação, e varia de 0 a 1, de acordo com o ângulo de visualização, comprimento de onda e textura do material.

**Figura 4.38:** Distribuição espectral de diferentes emissividades  
*Emissividade vs. Comprimento de Onda*



Para inspeções em componentes elétricos geralmente adota-se  $\epsilon=0,8$ , porque a emissividade de diferentes tipos de material é variável, sendo que na prática o valor de 0,8 é considerado como sendo um valor médio.

Num corpo não negro, uma parte da radiação total incidente é absorvida e, por conservação de energia, a restante é refletida ( $\rho$ ) na superfície e transmitida ( $\tau$ ) através do corpo ( $\epsilon+\rho+\tau=1$ ).

Um corpo real tem uma emissão dada pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$W = \sigma \epsilon T^4 \quad (4.11)$$

onde:

$W$  - potência radiante [ $W/m^2$ ]

$\sigma$  - constante de Stefan-Boltzmann [ $5,7 \times 10^{-8} \text{ W/K}^4 \text{ m}^2$ ]

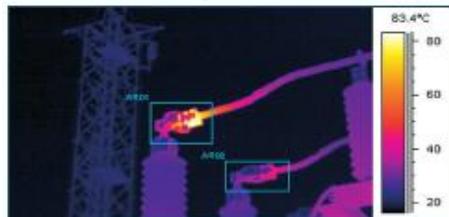
T - temperatura absoluta [K]

$\epsilon$  - emissividade

Através de vários estudos, chegou-se a valores para temperaturas máximas admissíveis (MTA), registradas pelo termovisor. Tais coeficientes de MTA determinam a intervenção (com urgência ou não) no sistema elétrico.

Os resultados obtidos com os termovisores são apresentados instantaneamente, durante a inspeção, na forma de imagens térmicas ou termogramas, com o auxílio de um software adequado à técnica da termografia. Os termogramas representam as temperaturas dos corpos na forma de cores, e como a imagem obtida com o termovisor é provida de uma escala que correlaciona cor e temperatura, é possível a obtenção de resultados esclarecedores quanto a problemas ligados direta ou indiretamente à temperatura. Com estas imagens, também é possível obter-se a temperatura em um ponto ou área do objeto analisado, conforme mostra a figura 4.39.

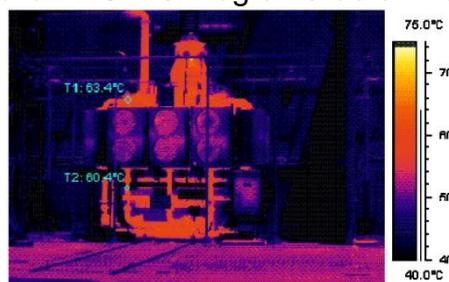
**Figura 4.39:** Termograma indicando problema na conexão da bucha do reator



Fonte: [87]

Através dessa técnica é possível detectar em estágio inicial, processos de falha gerados por anomalias térmicas em determinados componentes antes que ocorra interrupção de funcionamento do equipamento. Em reatores a termografia é utilizada para detectar aquecimentos em: conexões de buchas, bornes, radiadores, cabos do painel de controle, etc. Além de identificar a influência da temperatura em reatores operando em sobrecarga, conforme mostra a figura 4.40.

**Figura 4.40:** Termograma de um reator



Fonte: [87]

#### 4.3.11 Ensaio de emissão acústica

O ensaio de emissão acústica consiste em detectar e analisar sinais oriundos de perturbações mecânicas transitórias que se propagam desde a sua origem até a superfície do equipamento sob ensaio, onde são captados por sensores piezoelétricos com sensibilidade e resposta em frequência adequada. Os fenômenos que dão origem a estas perturbações podem ser das mais diversas naturezas possíveis, como mecânicos (crescimento de trincas, atrito, etc.), elétricos (descargas parciais, arcos elétricos), térmicos, magnéticos, etc.

São instalados sensores distribuídos ao longo da superfície externa do equipamento sob ensaio, conforme mostra a figura 4.41, e os sinais obtidos são analisados em um sistema de medição que determina os diversos parâmetros que os caracterizam, como a taxa de ocorrência de sinais, suas amplitudes, durações, energias, tempos de subida, frequências média e outros.

**Figura 4.41:** Distribuição de sensores para medição de emissão acústica



Fonte: [88]

Cada sinal recebido recebe uma etiqueta de tempo referente ao instante da sua detecção, sendo este conjunto de dados armazenado em um arquivo digital para posterior análise. Além dos sensores de detecção de perturbações é instalado um sensor para detectar ocorrência de chuva durante o ensaio que geralmente dura de 12 a 24 horas.

Uma característica interessante desta técnica de ensaio é a possibilidade de determinar a posição da fonte dos sinais detectados, uma vez que ficam conhecidas as diferenças de tempo entre a detecção de um mesmo evento por diversos sensores posicionados em diferentes pontos do equipamento, sendo conhecida a velocidade de propagação das perturbações.

Para a localização espacial da origem de um evento acústico, há a necessidade de que pelo menos quatro sensores sejam sensibilizados pelo mesmo. Para isto a disposição dos sensores deve ser conhecida em forma de coordenadas em relação à origem adotada (base da estrutura à esquerda do painel de proteção do equipamento), conforme mostra a tabela 4.18.

**Tabela 4.18:** Coordenadas cartesianas dos sensores em relação à origem

N°	Coordenadas (m)			N°	Coordenadas (m)		
	x	y	Z		x	y	Z
1	0.27	2.90	0.00	13	3.73	2.90	1.85
2	0.27	1.22	0.00	14	3.73	1.16	1.85
3	0.66	2.41	-0.74	15	1.90	0.08	1.85
4	2.28	2.41	-0.74	16	0.27	1.16	1.85
5	3.27	2.41	-0.74	17	0.27	2.90	1.85
6	3.73	2.90	0.00	18	0.00	0.26	1.58
7	3.60	1.16	0.00	19	0.00	2.85	1.58
8	4.00	0.83	0.27	20	0.00	1.07	0.94
9	4.00	2.90	0.27	21	0.00	2.06	0.94
10	4.00	0.15	0.94	22	0.00	0.26	0.27
11	4.00	2.90	1.58	23	0.00	2.85	0.27
12	4.00	0.83	1.58	24	Sensor de chuva		

Fonte: [88]

De modo a ser possível uma inspeção detalhada, em cada caneco da bucha de alta tensão, também deve ser posicionado um sensor acústico.

O ensaio é global, e pode ser realizado nas condições normais de operação ou com um incremento entre 5% a 10% da máxima condição de operação. O objetivo é avaliar a condição de integridade, localizando e classificando as áreas ativas quanto ao grau de comprometimento. Áreas ativas classificadas como severas devem ser examinadas profundamente por outras técnicas de ensaios não destrutivos, como por exemplo, ultrassom para caracterização da morfologia e dimensionamento dos defeitos presentes.

#### 4.3.12 Ensaio de vibração e ruído

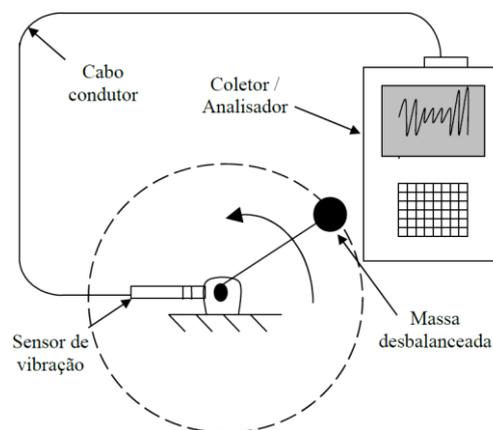
Alguns reatores quando em funcionamento podem apresentar elevadas amplitudes de vibração estrutural e ruído. Estas elevadas vibrações são comumente

causadas por excitações eletromagnéticas (magnetostricção) provenientes de um núcleo interno, fixado rigidamente à sua carcaça, na maioria dos casos, sem a utilização de isoladores de vibração. Por este motivo, surgem esforços dinâmicos harmônicos em virtude das forças eletromagnéticas cuja oscilação é transmitida integralmente à superfície externa do reator, e se manifesta como “zumbido” incômodo, de acordo com [89] e [90].

Essas altas amplitudes de vibração produzem, muitas vezes, trincas na estrutura dos reatores, provocando, assim, vazamento do óleo isolante presente no interior de tais equipamentos, o que pode causar danos permanentes ou interrupção na operação dos mesmos, além de promover o aparecimento de pontos quentes, podendo gerar bolhas de gases altamente inflamáveis, advindos do aquecimento do óleo.

A vibração em um equipamento é codificada em sinal elétrico pelo sensor, que por sua vez é transmitida através de cabos condutores até o coletor/analizador. A partir daí o mesmo sinal elétrico é interpretado por um software que através de um programa passa a apresentá-lo na forma de sinal no tempo ou espectro de frequência, tornando a análise das condições do equipamento bem mais fácil [91]. A figura 4.42 mostra o esquema da instrumentação para coleta e análise de dados.

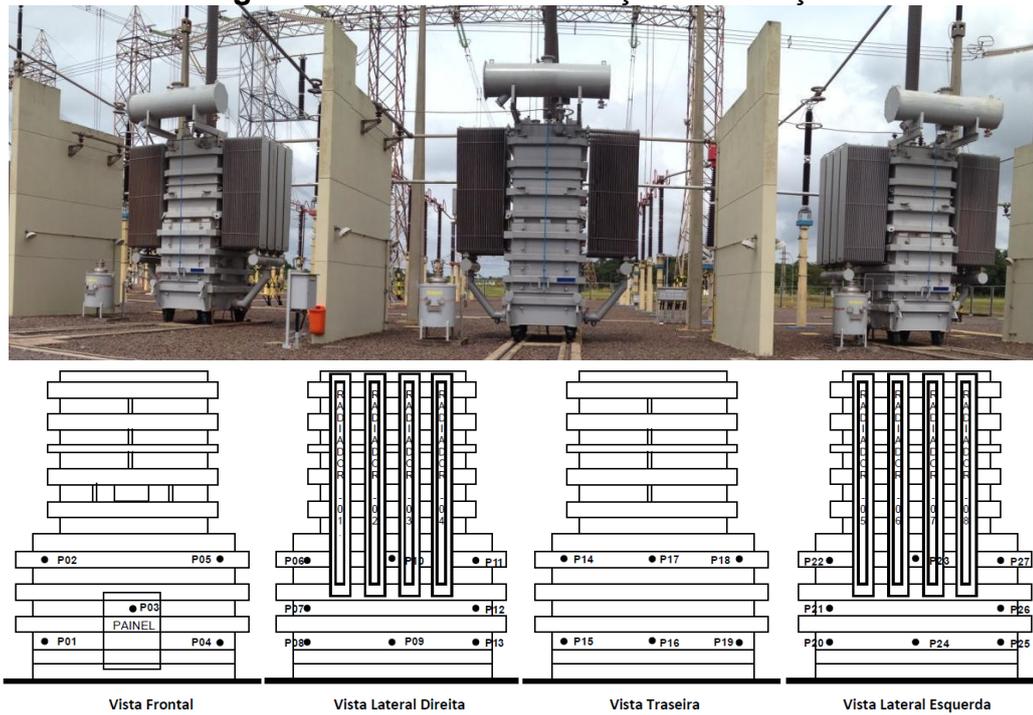
**Figura 4.42:** Diagrama esquemático para análise de vibração em um equipamento



Fonte: [91]

Os pontos de coleta dos sinais de vibração são distribuídos ao longo da superfície externa dos reatores e localizados conforme indicado na figura 4.43.

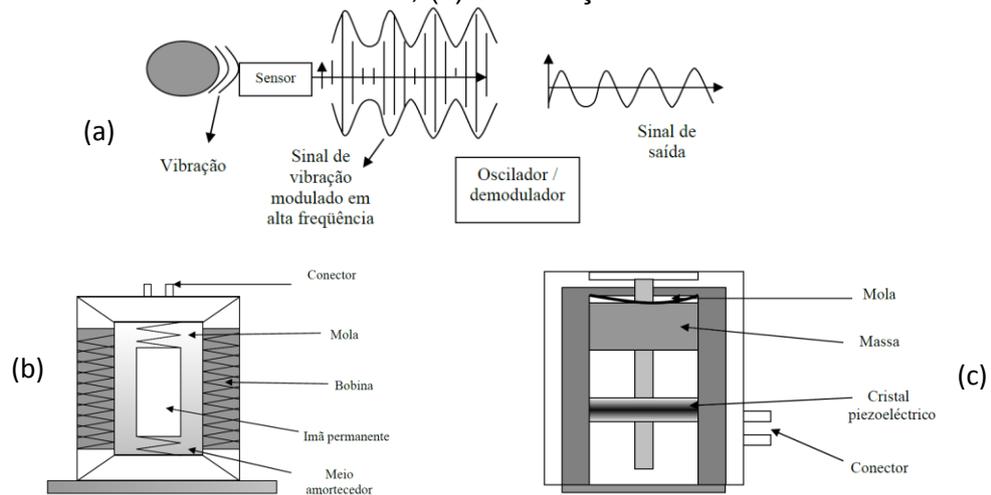
**Figura 4.43:** Pontos de medição de vibração



Fonte: [88]

Os sensores de vibração, dispositivos que fazem a codificação de um sinal mecânico em um sinal elétrico representativo, podem ser basicamente de três tipos: de deslocamento, de velocidade e o acelerômetro, conforme mostra a figura 4.44.

**Figura 4.44:** Desenho esquemático de um sensor de: (a) deslocamento, (b) velocidade, (c) aceleração



Fonte: [91]

Os coletores, que fazem parte de qualquer programa de acompanhamento de vibrações podem receber dados de vibrações do tipo deslocamento, velocidade e aceleração. Os coletores podem também possuir um software instalado, que permite uma pré-análise nos espectros obtidos quando não se pode dispor de um

computador. São executados o máximo possível de medições do equipamento sob análise em campo, e armazenados todos estes dados na memória do coletor, para que posteriormente sejam “descarregados” em um computador, e analisados com maior comodidade em um ambiente mais favorável através de um software com mais recursos [91].

Atualmente existem vários softwares para análise de vibração em manutenção preditiva, onde se podem definir quais os equipamentos a acompanhar e também os pontos que serão monitorados. Além disso, estes softwares podem fornecer vários tipos de relatórios de acompanhamento e análise.

O ruído acústico gerado em um reator tem por origem as vibrações estruturais destes equipamentos, o sistema de refrigeração, o chaveamento, o efeito corona, a magnetostricção, entre outros. Porém, a principal causa do elevado ruído é a vibração gerada pelo núcleo do reator que é transmitida ao resto da carcaça e sistemas auxiliares a ele fixados.

Os níveis de ruído produzidos por reatores não devem exceder os níveis especificados na tabela 4.19, quando ensaiados de acordo com a NBR-7277.

**Tabela 4.19:** Níveis de ruído para reatores em óleo com potência  $\geq 12500$  kVAr

Nível médio de ruído (dB)	Potência nominal (MVA)		
	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico		
	950 e 1050 Kv	1175 kV	$\geq 1300$ kV
76	12,5	-	-
77	15	12,5	-
78	20	15	12,5
79	25	20	15
80	30	25	20
81	40	30	25
82	50	40	30
83	60	50	40
84	80	60	50
85	100	80	60
86	-	100	80
87	-	-	100

Fonte: [92]

Dos ensaios que podem ser realizados em campo, e que foram apresentados no item 4.3, apenas três não serão utilizados neste trabalho para avaliação da condição de reatores, por não haver dados suficientes, a saber: Medição de descargas parciais, Ensaio de termografia e Ensaio de emissão acústica.

## **5 Metodologia de avaliação da condição dos reatores**

### **5.1 Avaliação da condição**

Na literatura o termo avaliação da condição é comumente usado tanto para o monitoramento quanto para o diagnóstico [93]. Entretanto é importante salientar que o principal objetivo da avaliação da condição neste trabalho é a realização de diagnóstico, através da execução de um conjunto de testes de diagnósticos para análise do estado de operação do reator e estimar a sua posição atual em relação ao seu ciclo de vida.

A definição para avaliação da condição neste trabalho é parecida com a definição dada pelo grupo de trabalho Cigré WG A2.18, Guia para Técnicas de Gestão de Vida para Transformadores de Potência, onde recomenda-se que a avaliação da condição deve usar um sistema de graduação para quantificar e combinar os resultados de vários testes de avaliações de condição [94].

Neste trabalho é proposta uma metodologia para satisfazer a necessidade de sistematizar a análise com a combinação de diferentes métodos de diagnósticos e mapear os resultados em um modelo de condição que oriente o ciclo de vida do reator.

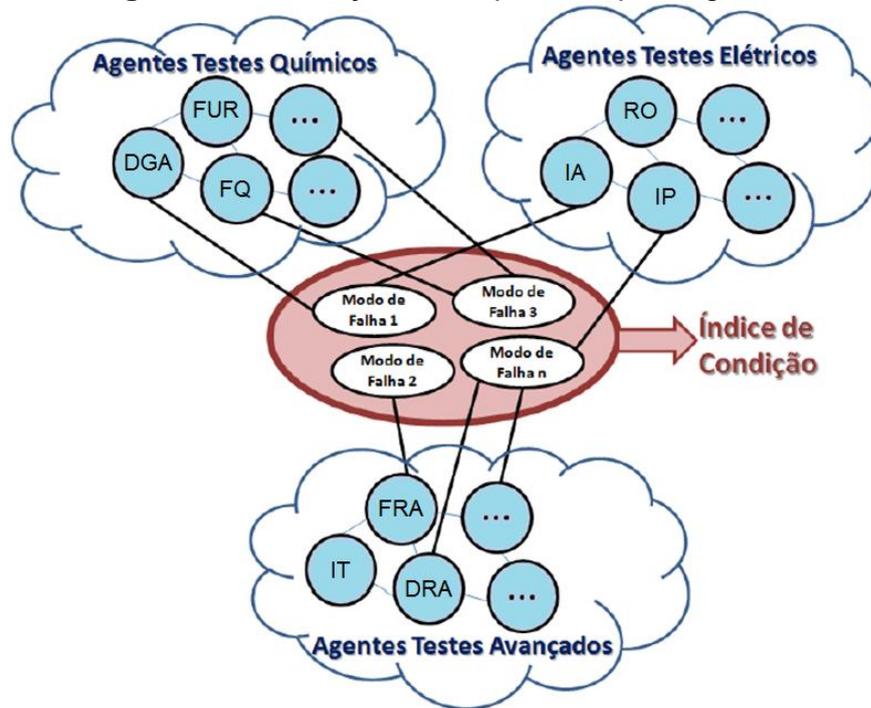
De acordo com a metodologia de MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance*), além de critérios de avaliação do reator, um padrão de registro dos dados para esta avaliação, com índices, nomenclaturas e estágios para quantificação são itens necessários na gestão de vida dos reatores. E na busca de um sistema de graduação para quantificar e combinar os resultados, a literatura apresenta alguns trabalhos de pesquisa com avaliação da condição na forma de um sistema de pontuação, geralmente chamado de Índice de Condição (IC) [95], [96], [97].

### **5.2 Sistema de avaliação por múltiplos agentes**

A utilização de vários métodos de diagnósticos para a implementação de estratégias de avaliação da condição de reatores considera todos os itens importantes para análise. Assim, define-se que cada um destes métodos de diagnósticos são considerados agentes que interagem entre si dentro de uma

ferramenta de análise para determinar o IC. Onde sistemas compostos de vários agentes são denominados de sistemas de múltiplos agentes, conforme ilustra a figura 5.1 [98].

**Figura 5.1:** Definição do IC por múltiplos agentes



Fonte: [93]

Dentro da ferramenta de análise, os agentes possuem basicamente duas competências importantes para o desenvolvimento da análise da condição. Essas definições devem ser levadas em consideração ao longo desse trabalho, a saber:

- Os agentes são, para algumas situações, capazes de ações autônomas, e
- Os agentes são capazes de interagir com outros agentes.

Portanto, pode-se também afirmar que cada método de diagnóstico é visto como um agente capaz de prover um julgamento da condição do reator.

Cada um desses agentes é desenvolvido utilizando a exploração de grandes quantidades de dados à procura de padrões consistentes, como regras de associação ou sequências temporais, para detectar relacionamentos sistemáticos entre variáveis assumindo como referência o histórico do equipamento, ou seja, o conhecimento coletado ao longo de anos pelos especialistas. Esses dados são armazenados em banco de dados próprio e assumidos como conhecimento prioritário para as análises.

### 5.3 Estruturação da metodologia

Sendo a condição de degradação de um reator um processo contínuo no tempo, este, conforme sugerido em [94], pode ser classificado em cinco estágios: Novo, Normal, Anormal, Defeituoso e Falhado. Cada estágio pode ser classificado em diferentes estados, e o valor numérico, obtido a partir da determinação do estado, representa um índice de condição conforme mostra a figura 5.2.

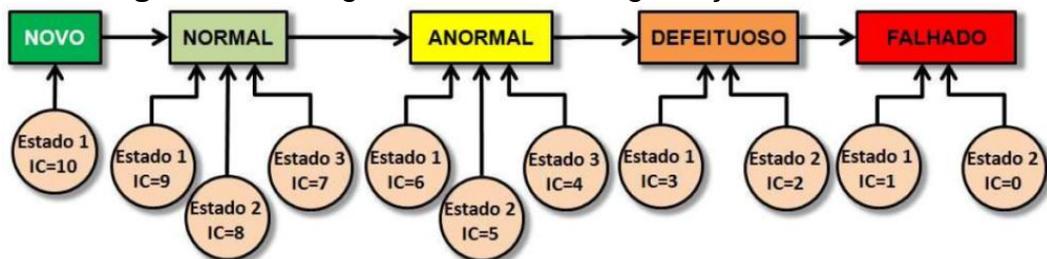
**Figura 5.2:** Hierarquia do Índice de Condição com Estágios e Estados



Fonte: Adaptado de [93]

Na figura 5.3 um índice de condição é associado a cada avaliação de estado. De acordo com esses valores, um reator com IC igual a 10 é considerado novo enquanto que um reator com IC igual a 0 é considerado falhado.

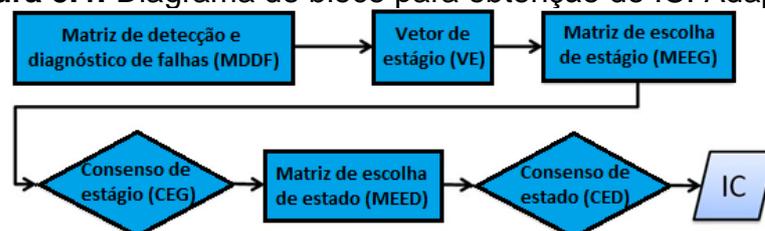
**Figura 5.3:** Estágios discretos da degradação de um reator



Fonte: [93]

A definição de um índice de condição é uma atividade complexa e desafiadora devido à diversidade de tipos de falhas e defeitos que podem ocorrer em um reator e devido às dificuldades de combinar a interpretação de resultados obtidos de diferentes métodos de detecção de falhas e diagnóstico. Assim, propõe-se um método sistemático de obtenção de índices de condição, conforme mostra o diagrama de blocos na figura 5.4, que será detalhado no decorrer deste capítulo.

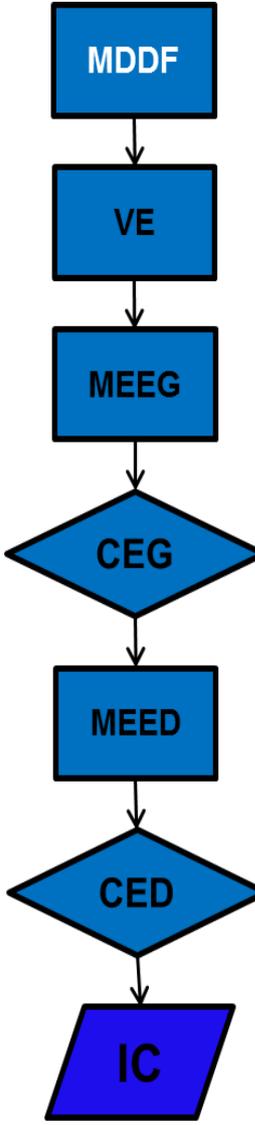
**Figura 5.4:** Diagrama de bloco para obtenção do IC. Adaptado



Fonte: [93]

O primeiro passo para definição de um IC é a definição de uma matriz de detecção e diagnóstico de falhas (MDDF) para reatores, conforme mostra a tabela 5.1.

Tabela 5.1: Matriz de detecção e diagnóstico de falhas - MDDF.



Modos de Falha		Testes Químicos			Testes Elétricos				Testes Avançados					
		Gasromatográfico	Físico-químico	Furfuraldeído	Resistência ôhmica	Carregamento	Res. isolamento DC	Índice absorção	Índice polarização	Impedância terminal	SFRA	Fator de potência ~ Hz	Capacitância ~ Hz	Dirana
Elétrica	Curto circuito entre espiras	•			•					•	•			
	Curto circuito para terra	•					•	•	•	•	•	•	•	
	Flutuação de potencial	•								•	•	•	•	
	Curto circuito das laminações do núcleo	•								•	•	•	•	
	Múltiplos aterramentos do núcleo	•									•	•	•	
	Núcleo desaterrado	•									•	•	•	
Térmica	Falha de circuito aberto	•			•					•	•	•		
	Falha de resistência de contato	•			•					•	•	•		
Mecânica	Inclinação do condutor									•	•	•		
	Movimento do enrolamento									•	•	•		
	Estrutura de fixação solta									•	•	•		•
	Deformação do condutor									•	•	•		•
Degradação	Degradação por umidade no óleo		•					•	•	•		•	•	•
	Degradação por umidade no papel							•	•			•	•	•
	Degradação por temperatura			•		•								
	Degradação por envelhecimento do óleo	•	•			•	•	•	•					•
	Degradação por envelhecimento do papel	•		•		•	•	•	•			•	•	•

Alta eficácia (FC: 0,9)
  Média eficácia (FC: 0,6)
  Baixa eficácia (FC: 0,4)

Fonte: Adaptado [93]

A MDDF, construída a partir de uma FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) com os resultados de uma análise detalhada dos modos de falha e suas causas, com consequências e medidas de controle, é mostrada na tabela 5.2.

Para cada modo de falha, o agente, ou seja, o método de diagnóstico que está disponível para diagnosticar este modo de falha é indicado. A eficácia de cada agente no diagnóstico é quantificada e representada por meio de fatores de certeza (FC), onde FC é igual a 0,9 para métodos altamente eficazes, FC é igual a 0,6 para métodos com eficácia mediana e FC é igual a 0,4 para métodos pouco eficazes.

Tabela 5.2: FMEA para reator

FMEA REATOR													
ITEM	SISTEMA	COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA	MEDIDA DE CONTROLE						
1	ISOLAÇÃO	A	ÓLEO	1	Isolar a parte ativa e dissipar o calor gerado pelo núcleo	1	Vazamento	Deterioração da parte ativa	Fissuras	Inspecção visual			
						2	Umidade	Deterioração dos componentes internos	Vedações danificadas	Inspecção visual			
						3	Oxidação	Sobreaquecimento	Fissuras ou vedações danificadas	Ensaio físico-químico			
						4	Presença de partículas	Sobrecarga	Penetração de ar	Ensaio físico-químico			
		B	PAPEL	1	Isolar as espiras	1	Umidade	Curto circuito	Fissuras ou vedações danificadas	Ensaio físico-químico			
						2	Temperatura	Curto circuito	Sobrecarga	Controle do regime de operação			
		2	Sustentar os enrolamentos	1	Esforço mecânico	Deformação no enrolamento	Perda da resistência mecânica	Ensaio de furaldeído					
2	PARTE ATIVA	A	NÚCLEO	1	Promover a indução eletromagnética no enrolamento	1	Núcleo sem aterramento	Falha do reator	Torque inadequado da conexão	Verificar torque			
						2	Perda do isolamento		Ruptura da conexão	Ensaio de resposta em frequência - SFRA e Impedância terminal			
							2	Sustentar os enrolamentos	1	Desalinhamento das chapas, armaduras e canais de refrigeração	Vibração e ruídos excessivos	Transporte inadequado	Ensaio de resistência de isolamento DC
												Ensaio de resposta em frequência - SFRA	
		B	ENROLAMENTO	1	Promover a indutância elétrica	1	Perda do isolamento	Curto circuito entre espiras	Deterioração do papel	Ensaio de vibração e ruído			
										Ensaio de furaldeído			
								Curto circuito entre enrolamento e massa	Deterioração do óleo	Determinar o grau de polimerização			
										Gas cromatografia			
						2	Abertura do enrolamento	Arco elétrico	Rompimento das espiras	Ensaio de furaldeído			
										Ensaio de fator de potência e capacitância			
						3	Deslocamento da bobina	Falha do reator	Esforços mecânicos causados por descarga	Ensaio de resposta em frequência - SFRA			
										Transporte inadequado	Ensaio de vibração e ruído		
				Ensaio de resposta em frequência - SFRA									
3	SELAGEM	A	TANQUE PRINCIPAL	1	Conter a parte ativa e o óleo isolante	1	Perda da estanqueidade	Vazamento de óleo e penetração de umidade	Vedações danificadas	Inspecção visual			
						2	Danos nos pontos de solda	Vazamento de óleo e penetração de umidade	Falha de execução	Utilização de revelador			
						3	Corrosão	Fissura	Vibração excessiva	Ensaio de vibração			
		B	TANQUE EXPANSÃO	1	Conter o volume de óleo expandido em função da temperatura	1	Perda da estanqueidade	Vazamento de óleo e penetração de umidade	Vedações danificadas	Inspecção visual			
						2	Danos nos pontos de solda	Vazamento de óleo e penetração de umidade	Falha de execução	Utilização de revelador			
						3	Corrosão	Fissura	Vibração excessiva	Ensaio de vibração e ruído			
		C	BOLSA DE BORRACHA / MEMBRANA	1	Evitar o contato do óleo isolante com o ar atmosférico	1	Rompimento	Oxidação do óleo	Deterioração da pintura	Verificação do estado geral da pintura			
		D	SECADOR DE AR	1	Retirar a umidade do ar do tanque de expansão	1	Penetração de umidade	Falha na isolação	Saturação da sílica gel	Verificação do sensor de bolsa rompida			
		E	PULMÃO	1	Isolar o ar do tanque expansão do ar externo	1	Entrada do ar ambiente	Oxidação do óleo	Rompimento da membrana	Ensaio físico-químico			
										Monitoramento da sílica gel			
										Ensaio de vibração e ruído			
										Inspecção visual da membrana			
		4	RESFRIGERAÇÃO	A	RADIADORES	1	Reduzir a temperatura do óleo	1	Obstrução das aletas	Elevação da temperatura do óleo	Deterioração do óleo isolante	Inspecção de termovisão	
								2	Fissuras	Vazamento	Intempéries	Inspecção visual	
				B	BOMBA DE CIRCULAÇÃO DE ÓLEO	1	Circular o óleo no reator	1	Desgaste de rolamento	Sobrecorrente no motor aquecimento do motor e atuação de relé térmico	Deterioração do material	Medição da corrente do motor	
2	Perda do isolamento							Queima do motor	Ensaio de vibração				
C	VENTILADOR			1	Aumentar a troca de calor no radiador	1	Desgaste de rolamento	Sobrecorrente no motor aquecimento do motor e atuação de relé térmico	Deterioração do material	Ensaio de resistência de isolamento DC			
						2	Hélice emperrada	Queima do motor		Medição da corrente do motor			
						3	Perda do isolamento do motor	Queima do motor	Oxidação do eixo	Inspecção de termovisão			
													Ensaio de vibração
										Medição da corrente do motor			
										Ensaio de resistência de isolamento DC			

FMEA REATOR									
ITEM SISTEMA	COMPONENTE	FUNÇÃO	MODO DE FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSA DA FALHA	MEDIDA DE CONTROLE			
5 ACCESÓRIOS	A	BUCHA	1	Isolar e permitir a passagem dos condutores entre os meios interno e externo	1	Perda da estanqueidade	Penetração de umidade e vazamento de óleo	Vedações danificadas	Ensaio de fator de potência e capacitância Inspeção visual
					2	Perda do aterramento do TAP	Elevação do potencial no TAP	Oxidação dos contatos	Inspeção visual
					3	Vazamento	Explosão da bucha	Quebra dos contatos	Análise gas cromatográfica
							Aquecimento	Vedações danificadas	Inspeção visual
					4	Poluição externa	Redução do nível de isolamento	Depósito de sujeira, partículas, sal e outros compostos	Medição de corona Inspeção visual
	5	Ponto quente nas conexões externas	Elevação da temperatura nas conexões	Torque inadequado das conexões	Inspeção de termovisão				
	B	TC's BUCHA	1	Fornecer sinais de corrente para a medição e proteção	1	Perda de isolamento do secundário	Curto circuito	Vedações danificadas	Inspeção visual
					2	Penetração de umidade e oxidação dos terminais secundários	Abertura do secundário provocando sobretensão e/ou explosão	Perda da estanqueidade	Ensaio de resistência de isolamento DC
	C	TERMÔMETRO	1	Fornecer as temperaturas do enrolamento e de topo de óleo para atuação dos sistemas de refrigeração e proteção	1	Temperaturas incoerentes	Elevação da temperatura sem atuação da ventilação / proteção	Instrumento não aferido	Ensaio de elevação de temperatura
					2	Perda de estanqueidade do fosso da sonda PT100	Baixo nível de óleo no fosso e indicação errada da temperatura do óleo	Vedações danificadas	Inspeção periódica no sistema de vedação
					3	Falta de atuação do sistema de ventilação	Sobreaquecimento e atuação do alarme / trip	Parametrização incorreta	Executar testes funcionais
					4	Falta de atuação do alarme e trip	Alívio de pressão por sobreaquecimento	Defeito nos componentes do termômetro	Executar testes funcionais
	D	VÁLVULAS	1	Permitir o fluxo do óleo	1	Travamento de válvulas	Interrupção do fluxo de óleo	Oxidação do sistema de travamento/abertura	Inspeccionar e confirmar a abertura das válvulas
			2	Interromper o fluxo do óleo	2		Permissão do fluxo de óleo		Inspeccionar e confirmar o fechamento das válvulas
	E	VEDAÇÕES	1	Preservar a estanqueidade	1	Vazamentos	Penetração de umidade	Material inadequado	Conferir material
							Baixo nível de óleo	Torque inadequado	Conferir torque
	F	INDICADOR DE NÍVEL DE ÓLEO	1	Indicar o nível de óleo	1	Travamento do ponteiro de indicação	Indicação incorreta	Travamento da haste ou da bóia	Teste funcional
					2	Perda de estanqueidade	Vazamento	Vedações danificadas	Inspeção visual
					3	Oxidação dos terminais da caixa de ligação	Sinalização indevida	Penetração de umidade	Inspeção visual
	G	RELÉ DE GÁS	1	Atuar na formação de gases ou na presença de fluxo anormal do óleo	1	Travamento das bóias	Presença de gases ou fluxo anormal de óleo sem atuação da proteção	Oxidação do sistema de bóias	Teste funcional
					2	Oxidação dos terminais da caixa de ligação	Sinalização indevida	Penetração de umidade	Inspeção visual
	H	DISPOSITIVO DE ALÍVIO DE PRESSÃO	1	Descarregar óleo devido aumento da pressão interna	1	Oxidação dos terminais da caixa de ligação	Atuação indevida	Penetração de umidade	Inspeção visual
	I	INDICADOR DE FLUXO	1	Indicar que há fluxo de óleo	1	Travamento da ponteiro de indicação	Indicação incorreta	Travamento da palheta	Teste funcional
	J	PAINEL DE CONTROLE	1	Abrigar componentes auxiliares de comando / monitoração e interligar sinais elétricos do reator com o SPCS e o centro de operação	1	Folga dos parafusos de fixação do armário	Movimentação do armário	Vibração excessiva	Ensaio de vibração
							Perda do aterramento do armário	Torque inadequado	Conferir torque e fazer teste de continuidade
					2	Penetração de umidade	Ponto quente nas conexões	Oxidação dos contatos dos terminais	Verificar o estado de conservação da borracha de vedação, dobradiças e fechadura da porta
							Curto circuitos das fiações	Perda da capacidade de isolamento dos cabos elétricos	Verificar o ajuste de temperatura do termostato e o funcionamento do resistor de aquecimento
3					Falta de identificações internas e externas	Conexões indevidas ou falta de informações	Indisponibilidade de placas, anilhas, etiquetas	Conferir a presença de placas dos circuitos, anilhas e etiquetas	
4					Folga das conexões elétricas	Ponto quente nas conexões	Torque inadequado	Conferir torque e fazer teste de continuidade	
5	Perda de isolamento dos cabos	Curto circuito entre os condutores ou contra a estrutura	Fim de vida útil	Ensaio de isolamento DC					
6	Danos dos componentes	Interrupção da funções dos componentes	Fim de vida útil	Teste funcional					
			Ajustes inadequados	Verificar ajustes					

Fonte: Autoria própria

O vetor de estágio (VE), com base no conhecimento sobre o impacto de cada modo de falha na condição do reator, associa um estágio específico para cada agente. Isto é realizado para cada modo de falha descrito na MDDF e mostrado na tabela 5.1. Por exemplo, para o modo de falha “degradação por umidade no papel”, destacado na tabela 5.3, o vetor de estágio pode apresentar como resultado cada um dos seguintes estágios: novo, normal, anormal, defeituoso ou falhado, dependendo da concentração de água do reator.

**Tabela 5.3:** Vetores de estágio para reator

Modo de Falha	Vetores de Estágio - VE																
	Físico-químico	Gascomatográfico	Furfuraldeído	Fator de potência ~ Hz	Capacitância ~ Hz	Res. ôhmica estática	Res. isolamento DC	Índice absorção	Índice polarização	Dirana	SFRA	Impedância terminal	Vibração e Ruído		Carregamento		
Curto circuito entre espiras		•				•					•	•					
Curto circuito para terra		•		•	•		•	•	•		•	•					
Flutuação de potencial		•		•	•						•	•					
Curto circuito das laminações do núcleo		•									•	•					
Múltiplos aterramentos do núcleo		•									•	•					
Núcleo desaterrado		•		•	•						•	•					
Falha de circuito aberto		•				•					•	•					
Falha resistência de contato		•				•					•	•					
Inclinação do condutor											•	•					
Movimento do enrolamento											•	•					
Estrutura de fixação solta											•	•	•				
Deformação do condutor				•	•						•	•	•				
Degradação por umidade no óleo	•			•	•		•	•	•		•	•					
<b>Degradação por umidade no papel</b>				•	•			•	•	•	•	•					
Degradação por temperatura				•	•						•	•					•
Degradação por envelhecimento do óleo	•	•					•	•	•	•	•	•					•
Degradação por envelhecimento do papel		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•					•

Fonte: Adaptado [93]

Na determinação do VE são utilizados os agentes apontados na tabela 5.1 - testes químicos, elétricos e avançados - sendo que cada um deles possui suas características próprias para análise da condição do reator.

Além das recomendações das normas ou estabelecidas pelos bancos de dados de diagnósticos de reatores, o critério de interpretação pode ser considerado como um agente com inteligência própria para gerar uma interpretação de resultados. E ao invés de uma avaliação determinística, com valores e intervalos de tolerância pré-determinados, a avaliação também pode ser realizada pelo especialista, chamada de Avaliação do Especialista Humano (AEH) ou pelo uso de um Algoritmo com Inteligência Artificial (AIA) [93].

Considerando que diferentes métodos de diagnósticos podem oferecer resultados contraditórios, a metodologia utiliza uma matriz de escolha de estágio (MEEG), conforme mostrado na tabela 5.4, que adota um valor bruto de estágio (VB<sub>EG</sub>) e um valor líquido de estágio (VL<sub>EG</sub>) para resolver conflitos entre os agentes.

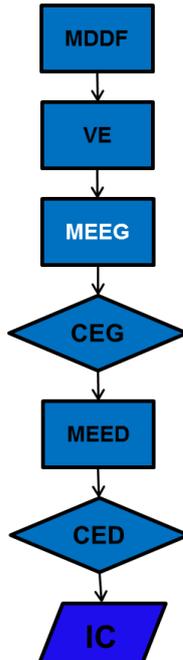
O VB<sub>EG</sub> é calculado pelo número de métodos votantes n<sub>k</sub>, para o estágio “k” do modo de falha “i”, dividido pelo número total de votos N, que é o número de métodos de diagnóstico utilizados capazes de diagnosticar o modo de falha “i”.

$$VB_{EG} = \frac{n_k}{N} \tag{5.1}$$

Devido o VB<sub>EG</sub> não levar em consideração a eficácia de cada método de diagnóstico, definido pelo fator de certeza, a determinação de um estágio nestes termos poderia ser errado. Para resolver este problema, o VB<sub>EG</sub> é transformado em VL<sub>EG</sub>, que é calculado de maneira similar a VB<sub>EG</sub>, mas neste caso o voto de cada método de diagnóstico é multiplicado pelo FC, constante na tabela 5.1.

$$VL_{EG} = \sum_{j=1}^{n_k} \frac{(VB_{EG_j} \times FC_j)}{n_k} \tag{5.2}$$

**Tabela 5.4:** Matriz de escolha de estágio para reator



Modo de Falha	MEEG											VBEG					VLEG								
	Vetores de Estágio - VE											Novo	Normal	Anormal	Defeituoso	Falhado	Novo	Normal	Anormal	Defeituoso	Falhado				
	Físico-químico	Gasromatográfico	Furfuraldeído	Fator de potência ~ Hz	Capacitância ~ Hz	Res. ôhmica estática	Res. isolamento DC	Índice absorção	Índice polarização	Dirana	SFRA											Impedância terminal	Vibração e Ruído	Carreamento	
Curto circuito entre espiras	*	*													0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.10	0.15	0.15		0.10	
Curto circuito para terra	*	*		*	*		*	*							0.13	0.25	0.25	0.13	0.25	0.11	0.19	0.15	0.11	0.16	
Flutuação de potencial	*	*		*	*										0.25	0.25		0.25	0.25	0.10	0.23		0.10	0.10	
Curto circuito das laminações do núcleo	*	*														0.50		0.50			0.45			0.20	
Múltiplos aterramentos do núcleo	*	*														0.50		0.50			0.20			0.20	
Núcleo desaterrado	*	*		*	*										0.25	0.25		0.25	0.25	0.10	0.23		0.10	0.10	
Falha de circuito aberto	*	*													0.25	0.25	0.25	0.25	0.23	0.23	0.23			0.10	
Falha resistência de contato	*	*		*	*							*	*		0.25	0.50	0.25	0.23	0.23	0.38				0.10	
Inclinação do condutor																1.00					0.90				
Movimento do enrolamento																1.00					0.90				
Estrutura de fixação solta												*	*	*			1.00				0.70				
Deformação do condutor				*	*							*	*		0.25	0.25	0.25	0.25	0.10		0.23	0.10	0.15		
Degradação por umidade no óleo	*			*	*		*	*	*	*					0.14	0.43	0.14	0.14	0.14	0.09	0.27	0.06	0.09	0.06	
Degradação por umidade no papel				*	*			*	*	*					0.20	0.40	0.20	0.20	0.08	0.20	0.08	0.08			
Degradação por temperatura				*	*								*			0.50	0.50				0.20	0.30			
Degradação por envelhecimento do óleo	*	*		*	*		*	*	*	*					*	0.43	0.29		0.29		0.27	0.11		0.11	
Degradação por envelhecimento do papel	*	*		*	*		*	*	*	*			*		0.11	0.33	0.22	0.11	0.22	0.04	0.18	0.09	0.04	0.09	

Fonte: Adaptado [93]

Os cálculos de  $VB_{EG}$  e  $VL_{EG}$  serão detalhados, na tabela 5.5, para o modo de falha “Degradação por umidade no papel”, destacada em vermelho, na tabela 5.4.

**Tabela 5.5:** Matriz de escolha de estágio para reator

Estágio	$VB_{EG} = \frac{n_k}{N}$	$VL_{EG} = \sum_{j=1}^{n_k} \frac{(VB_{EGj} \times FC_j)}{n_k}$
Novo	$VB_{EG} = \frac{1}{4} = 0,25$	$VL_{EG} = \frac{0,25 * 0,9}{1} = 0,23$
Normal	-	-
Anormal	$VB_{EG} = \frac{2}{4} = 0,50$	$VL_{EG} = \left(\frac{0,5 * 0,6}{2}\right) + \left(\frac{0,5 * 0,9}{2}\right) = 0,38$
Defeituoso	-	-
Falhado	$VB_{EG} = \frac{1}{4} = 0,25$	$VL_{EG} = \frac{0,25 * 0,4}{1} = 0,10$

Fonte: Autoria própria

O consenso de estágio (CEG) para cada modo de falha é baseado no maior valor de  $VL_{EG}$ , conforme mostra o exemplo da tabela 5.6. E o estágio da condição do reator sempre será o estágio mais crítico encontrado pelo CEG.

**Tabela 5.6:** Consenso de estágio para reator

```

graph TD
    MDDF[MDDF] --> VE[VE]
    VE --> MEEG[MEEG]
    MEEG --> CEG{CEG}
    CEG --> MEED[MEED]
    MEED --> CED{CED}
    CED --> IC[/IC/]
        
```

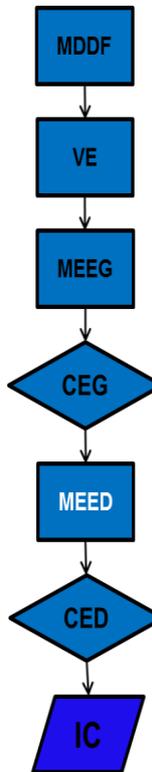
Modo de Falha	MEEG														Consenso de Estágio (CEG)										
	Vetores de Estágio - VE										VBEG		VLEG												
	Físico-químico	Gasromatográfico	Furfuraldeído	Fator de potência ~ Hz	Capacitância ~ Hz	Res. ôhmica estática	Res. isolamento DC	Índice absorção	Índice polarização	Dirana	SFRA	Impedância terminal	Vibração e Ruído	Carrregamento		Novo	Normal	Anormal	Defeituoso	Falhado					
Curto circuito entre espiras															0,25	0,25	0,25		0,25	0,10	0,15	0,15		0,10	?
Curto circuito para terra															0,13	0,25	0,25	0,13	0,25	0,11	0,19	0,15	0,11	0,16	Normal
Flutuação de potencial															0,25	0,25		0,25	0,25	0,10	0,23		0,10	0,10	Normal
Curto circuito das laminações do núcleo																0,50		0,50		0,45			0,20	0,20	?
Multiplos aterramentos do núcleo															0,50		0,20						0,20	0,20	?
Núcleo desaterrado															0,25	0,25		0,25	0,25	0,10	0,23		0,10	0,10	Normal
Falha de circuito aberto															0,25	0,25	0,25		0,25	0,23	0,23	0,23		0,10	?
Falha resistência de contato															0,25	0,50	0,25	0,23		0,38			0,10	Anormal	
Inclinação do condutor																1,00				0,90					Normal
Movimento do enrolamento																1,00				0,90					Normal
Estrutura de fixação solta																	1,00			0,70					Anormal
Deformação do condutor															0,25	0,25	0,25	0,25	0,10		0,23	0,10	0,15	0,15	Anormal
Degradação por umidade no óleo															0,14	0,43	0,14	0,14	0,14	0,09	0,27	0,06	0,09	0,06	Normal
Degradação por umidade no papel															0,20	0,40	0,20	0,20		0,08	0,20	0,08	0,08		Normal
Degradação por temperatura																0,50	0,50			0,20	0,30				Anormal
Degradação por envelhecimento do óleo															0,43	0,29		0,29		0,27	0,11		0,11		Normal
Degradação por envelhecimento do papel															0,11	0,33	0,22	0,11	0,22	0,04	0,18	0,09	0,04	0,09	Normal

Fonte: Adaptado [93]

Considerando que pode existir mais de um estado dentro de cada estágio, conforme mostra a figura 5.3, outro consenso por voto é necessário para resolver os conflitos entre estados dentro de um mesmo estágio. E uma matriz de escolha de

estado (MEED), conforme mostrado na tabela 5.7, que adota um valor bruto de estado ( $VB_{ED}$ ), que é apontado pelo resultado fornecido pelo agente para cada modo de falha “i”, e um valor líquido de estado ( $VL_{ED}$ ), que corresponde ao  $VL_{EG}$ , é utilizada para resolver conflitos entre os estados.

**Tabela 5.7:** Matriz de escolha de estado para reator



Modo de Falha	MEEG										Consenso de Estágio (CEG)	MEED			
	$VB_{EG}$					$VL_{EG}$						Estado 1	Estado 2	Estado 3	Anormal
	Novo	Normal	Anormal	Defeituoso	Falhado	Novo	Normal	Anormal	Defeituoso	Falhado					
Curto circuito entre espiras	0,25	0,25	0,25		0,25	0,10	0,15	0,15		0,10	?				
Curto circuito para terra	0,13	0,25	0,25	0,13	0,25	0,11	0,19	0,15	0,11	0,16	Normal				
Flutuação de potencial	0,25	0,25		0,25	0,25	0,10	0,23		0,10	0,10	Normal				
Curto circuito das laminações do núcleo		0,50			0,50		0,45			0,20	Normal				
Múltiplos aterramentos do núcleo		0,50			0,50			0,20		0,20	?				
Núcleo desaterrado	0,25	0,25		0,25	0,25	0,10	0,23		0,10	0,10	Normal				
Falha de circuito aberto	0,25	0,25	0,25		0,25	0,23	0,23	0,23		0,10	?				
Falha resistência de contato	0,25		0,50		0,25	0,23		0,38		0,10	Anormal	•			0,38
Inclinação do condutor		1,00					0,90				Normal				
Movimento do enrolamento		1,00					0,90				Normal				
Estrutura de fixação solta			1,00					0,70			Anormal		•		0,70
Deformação do condutor	0,25		0,25	0,25	0,25	0,10		0,23	0,10	0,15	Anormal		•		0,23
Degradação por umidade no óleo	0,14	0,43	0,14	0,14	0,14	0,09	0,27	0,06	0,09	0,06	Normal				
Degradação por umidade no papel	0,20	0,40	0,20	0,20		0,08	0,20	0,08	0,08		Normal				
Degradação por temperatura		0,50	0,50				0,20	0,30			Anormal	•			0,30
Degradação por envelhecimento do óleo		0,43	0,29		0,29		0,27	0,11		0,11	Normal				
Degradação por envelhecimento do papel	0,11	0,33	0,22	0,11	0,22	0,04	0,18	0,09	0,04	0,09	Normal				

Fonte: Adaptado [93]

No exemplo da tabela 5.7 observa-se que quatro modos de falhas (Falha resistência de contato, Estrutura de fixação solta, Deformação do condutor, Degradação por temperatura) foram classificados no estágio “Anormal”.

Sendo que, com base no resultado fornecido pelo critério de interpretação do agente - que será detalhado no item 5.4 - dois destes estágios foram classificados no “Estado 2” e os outros dois estágios foram classificados no “Estado 3”. Neste caso é necessário um consenso de estado que é baseado sempre no maior valor de  $VL_{ED}$ .

Assim o reator, exemplificado na tabela 5.7, obteve no consenso de estado (CED) o “Estado 3”, conforme mostra tabela 5.8, uma vez que 0,7 foi o maior valor de  $VL_{ED}$ .

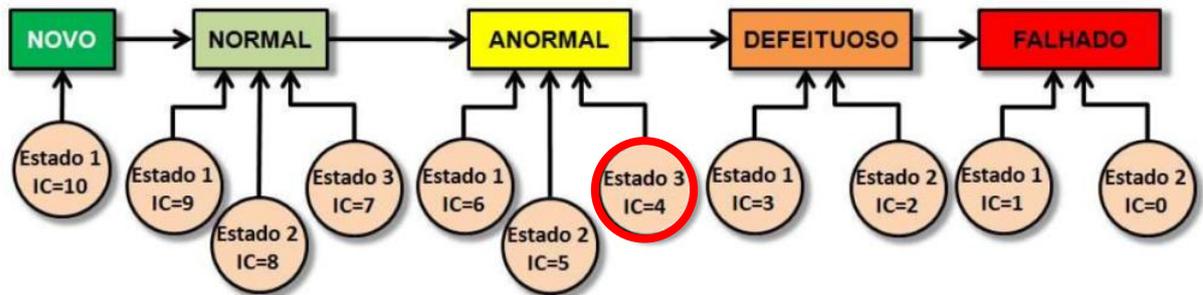
Tabela 5.8: Consenso de estado para reator

Modo de Falha	MEEG					Consenso de Estágio (CEG)	MEED				Consenso de Estado (CED)
	VLEg						VBED-Anormal			VLED	
	Novo	Normal	Anormal	Defeituoso	Falhado		Estado 1	Estado 2	Estado 3	Anormal	
Curto circuito entre espiras	0,10	0,15	0,15		0,10	?					
Curto circuito para terra	0,11	0,19	0,15	0,11	0,16	Normal					
Flutuação de potencial	0,10	0,23		0,10	0,10	Normal					
Curto circuito das laminações do núcleo		0,45			0,20	Normal					
Multiplos aterramentos do núcleo		0,20			0,20	?					
Núcleo desaterrado	0,10	0,23		0,10	0,10	Normal					
Falha de circuito aberto	0,23	0,23	0,23		0,10	?					
Falha resistência de contato	0,23		0,38		0,10	Anormal		•		0,38	
Inclinação do condutor		0,90				Normal					
Movimento do enrolamento		0,90				Normal					
Estrutura de fixação solta			0,70			Anormal		•		0,70	Estado 3
Deformação do condutor	0,10		0,23	0,10	0,15	Anormal		•		0,23	
Degradação por umidade no óleo	0,09	0,27	0,06	0,09	0,06	Normal					
Degradação por umidade no papel	0,08	0,20	0,08	0,08		Normal					
Degradação por temperatura		0,20	0,30			Anormal		•		0,30	
Degradação por envelhecimento do óleo		0,27	0,11		0,11	Normal					
Degradação por envelhecimento do papel	0,04	0,18	0,09	0,04	0,09	Normal					

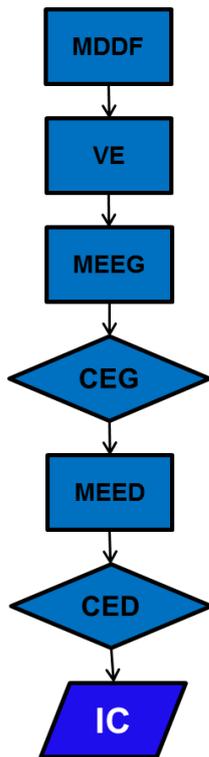
Fonte: Autoria própria

Definidos o “Estágio Anormal” pelo consenso de estágio e o “Estado 3” pelo consenso de estado, finalmente, com base na figura 5.5, pode-se determinar o índice da condição do reator dentro do modelo de condição de degradação, conforme mostra o exemplo da tabela 5.9.

Figura 5.5: Definição do Índice da Condição (IC) de um reator



Fonte: Adaptado [93]

**Tabela 5.9:** Índice da condição para reator


Modo de Falha	Consenso de Estágio (CEG)	Consenso de Estado (CED)	Índice da Condição
Curto circuito entre espiras	?		
Curto circuito para terra	Normal		
Flutuação de potencial	Normal		
Curto circuito das laminações do núcleo	Normal		
Multiplos aterramentos do núcleo	?		
Núcleo desaterrado	Normal		
Falha de circuito aberto	?		
Falha resistência de contato	Anormal		
Inclinação do condutor	Normal		
Movimento do enrolamento	Normal		
Estrutura de fixação solta	Anormal	Estado 3	4
Deformação do condutor	Anormal		
Degradação por umidade no óleo	Normal		
Degradação por umidade no papel	Normal		
Degradação por temperatura	Anormal		
Degradação por envelhecimento do óleo	Normal		
Degradação por envelhecimento do papel	Normal		

Fonte: Autoria própria

#### 5.4 Critérios de interpretação dos agentes

Neste tópico serão apresentados os critérios de interpretação de catorze agentes, ou seja, métodos de diagnóstico apresentados no capítulo 4, que foram utilizados na avaliação da condição dos dez reatores diagnosticados deste trabalho, conforme segue:

- Físico-químico;
- Gascromatográfico;
- Furfuraldeído;
- Fator de potência com variação de frequência (~ Hz);
- Capacitância com variação de frequência (~ Hz);
- Resistência ôhmica;
- Resistência. isolamento DC;
- Índice absorção;
- Índice polarização;
- Análise de resposta do dielétrico - Dirana;
- Análise de resposta por varredura de frequência - SFRA;
- Impedância terminal;
- Vibração e Ruído;
- Carregamento.

### 5.4.1 Critérios físico-químicos

A tabela 5.10 mostra o critério de interpretação, segundo a autora, para os resultados dos testes físico-químicos.

**Tabela 5.10:** Critérios de interpretação do agente físico-químico do óleo isolante

Estágio / Estado	Índice de neutralização (mg KOH/g) min.	Rigidez dielétrica (kV) min.		Fator de potência (%) max.		Tensão interfacial (dinas/cm) min.	Teor de água (ppm) max.
		Disco	Calota	25°C	100°C		
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>≤ 0,03</b>	<b>≥ 60</b>	<b>≥ 80</b>	<b>≤ 0,05</b>	<b>≤ 0,6</b>	<b>≥ 40</b>	<b>≤ 10</b>
Estado 1	≤ 0,03	≥ 60	≥ 80	≤ 0,05	≤ 0,6	≥ 40	≤ 10
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>0,04 - 0,15</b>	<b>59 - 45</b>	<b>79 - 60</b>	<b>0,04 - 0,5</b>	<b>0,07 - 13</b>	<b>39 - 25</b>	<b>9 - 24</b>
Estado 1	0,04 - 0,08	59 - 55	79 - 73	0,04 - 0,2	0,07 - 4,5	39 - 35	9 - 14
Estado 2	0,09 - 0,12	54 - 50	72 - 67	0,21 - 0,4	4,6 - 9	34 - 30	15 - 20
Estado 3	0,13 - 0,15	49 - 45	66 - 60	0,41 - 0,5	10 - 13	29 - 25	21 - 24
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>0,16 - 0,25</b>	<b>46 - 30</b>	<b>59 - 40</b>	<b>0,06 - 0,11</b>	<b>14 - 18</b>	<b>24 - 20</b>	<b>25 - 30</b>
Estado 1	0,16 - 0,18	46 - 42	59 - 53	0,06 - 0,07	13 - 14	24 - 23	25 - 26
Estado 2	0,19 - 0,21	41 - 36	52 - 48	0,08 - 0,09	15 - 16	22 - 21	27 - 28
Estado 3	0,22 - 0,25	35 - 30	47 - 40	0,1 - 0,11	17 - 18	20 - 19	39 - 30
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>0,26 - 0,35</b>	<b>29 - 20</b>	<b>39 - 30</b>	<b>0,12 - 1,2</b>	<b>19 - 22</b>	<b>18 - 15</b>	<b>31 - 35</b>
Estado 1	0,26 - 0,30	29 - 25	39 - 35	0,12 - 0,66	19 - 20	18 - 17	31 - 33
Estado 2	0,31 - 0,35	24 - 20	34 - 30	0,67 - 1,2	21 - 22	16 - 15	34 - 35
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>0,36 - 0,40</b>	<b>19 - 15</b>	<b>29 - 25</b>	<b>1,13 - 1,5</b>	<b>23 - 25</b>	<b>14 - 10</b>	<b>36 - 40</b>
Estado 1	0,36 - 0,39	19 - 16	29 - 26	1,13 - 1,49	23 - 24	14 - 11	36 - 39
Estado 2	≥ 0,40	≤ 15	≤ 25	≥ 1,5	≥ 25	≤ 10	≥ 40

Fonte: Autoria própria

### 5.4.2 Critérios gascromatográficos

A tabela 5.11 mostra o critério de interpretação individual da concentração de Total de Gases Combustíveis (TDCG) presente na norma IEEE C57.104 [77], que aliada ao método do triângulo de Duval avalia os resultados dos ensaios gascromatográficos [73].

**Tabela 5.11:** Critérios de interpretação para as concentrações individuais de gases

Estágio/Estado	Concentrações Individuais (ppm)							TDCG
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>≤30</b>	<b>≤40</b>	<b>≤5</b>	<b>≤10</b>	<b>≤35</b>	<b>≤200</b>	<b>≤1500</b>	<b>&lt;600</b>
Estado 1	≤30	≤40	≤5	≤10	≤35	≤200	≤1500	<600
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>31-100</b>	<b>41-120</b>	<b>5-35</b>	<b>11-50</b>	<b>36-65</b>	<b>201-350</b>	<b>1501-2500</b>	<b>601...1000</b>
Estado 1	31-50	41-68	6-15	11-24	36-45	201-250	1501-1834	601...720
Estado 2	51-70	69-94	16-25	25-37	46-56	251-300	1835-2168	721...850
Estado 3	71-100	95-120	26-35	38-50	57-65	301-350	2169-2500	851...1000
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>101-700</b>	<b>121-400</b>	<b>36-50</b>	<b>51-100</b>	<b>66-100</b>	<b>351-570</b>	<b>2500-4000</b>	<b>1001...2000</b>
Estado 1	101-300	121-214	36-40	51-66	66-77	351-424	2500-3000	1001...1300
Estado 2	301-500	215-307	41-45	66-82	78-89	425-497	3001-3500	1301...1700
Estado 3	501-700	308-400	46-50	83-100	90-100	498-570	3501-4000	1701...2000
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>701-1800</b>	<b>401-1000</b>	<b>51-80</b>	<b>101-200</b>	<b>101-150</b>	<b>571-1400</b>	<b>4001-10000</b>	<b>2001...4000</b>
Estado 1	701-1250	401-700	51-65	101-150	101-125	571-985	4001-7000	2001...3000
Estado 2	1251-1800	701-1000	66-80	151-200	126-150	986-1400	7001-10000	3000...4000
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>&gt;1800</b>	<b>&gt;1000</b>	<b>&gt;80</b>	<b>&gt;200</b>	<b>&gt;150</b>	<b>&gt;1400</b>	<b>&gt;10000</b>	<b>&gt;4000</b>

Fonte: [93]

### 5.4.3 Critérios de furfuraldeído

A tabela 5.12 mostra o critério de interpretação, segundo a autora, para os resultados dos ensaios de furfuraldeído, onde o diagnóstico é realizado com o auxílio da curva de correlação laboratorial “Furfuraldeído x GP” elaborada por P. J. Burton e mostrada na figura 4.6.

A análise deve levar em consideração não só a concentração de furanos, mas a combinação entre a idade teórica e a idade real, onde um equipamento é considerado normalmente envelhecido quando sua idade teórica calculada pela curva de Burton, variar de  $\pm 20\%$  da sua idade real.

**Tabela 5.12:** Critérios de interpretação para compostos furânicos

<b>Estágio / Estado</b>	<b>Furanos (ppm)</b>	<b>Grau de Polimerização</b>
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>0</b>	<b>1500 - 1199</b>
Estado 1	0	1500 - 1199
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>0,01 - 0,09</b>	<b>1200 - 701</b>
Estado 1	0,01 - 0,03	1200 - 1101
Estado 2	0,04 - 0,06	1100 - 901
Estado 3	0,07 - 0,09	900 - 701
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>0,1 - 0,9</b>	<b>700 - 451</b>
Estado 1	0,1 - 0,3	700 - 601
Estado 2	0,4 - 0,6	600 - 501
Estado 3	0,7 - 0,9	500 - 451
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>1 - 8</b>	<b>450 - 251</b>
Estado 1	1 - 4	450 - 351
Estado 2	5 - 8	350 - 251
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>9 - 10</b>	<b>250 - 150</b>
Estado 1	9 - 10	250 - 151
Estado 2	> 10	≤ 150

Fonte: Autoria própria

### 5.4.4 Critérios de fator de potência

A tabela 5.13 mostra os critérios de interpretação para os resultados dos testes de fator de potência em reatores a óleo. Na tabela 5.13 (Critérios de interpretação de fator de potência em reatores) pode-se observar três critérios bem definidos de análise, sendo:

- **Medida em 60 Hz:** análise referenciada de acordo com a norma IEEE 62:1995, observando a diferença do valor medido com relação ao valor do Fator de Potência medido na frequência de 60 Hz.
- **Medida com variação de frequência entre 15 e 400 Hz:** análise realizada de acordo com a assinatura obtida a partir de valores de fator potência medidos em várias frequências.

- **Varição FPref:** análise realizada com a comparação do fator potência medido em 60 Hz com o fator potência de referência do reator (valor de placa ou de comissionamento).

**Tabela 5.13:** Critérios de interpretação de fator de potência em reatores a óleo

Estágio / Estado	Fator de Potência		
	Medida em 60 Hz (%)	Medida entre 15 e 400 Hz	Varição FPref
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>&lt; 0,5</b>	<b>AEH</b>	<b>FPmed &lt; 1,1 x Fpref</b>
Estado 1	< 0,5	AEH	FPmed < 1,1 x Fpref
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>0,5 - 1,0</b>	<b>AEH</b>	<b>FPmed &lt; 2,2 x Fpref</b>
Estado 1	0,5 - 0,6	AEH	FPmed < 2,0 x Fpref
Estado 2	0,7 - 0,8	AEH	FPmed < 2,1 x Fpref
Estado 3	0,9 - 1,0	AEH	FPmed < 2,2 x Fpref
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>1,10 - 1,2</b>	<b>AEH</b>	<b>FPmed &lt; 2,5 x Fpref</b>
Estado 1	1,10 - 1,13	AEH	FPmed < 2,3 x Fpref
Estado 2	1,14 - 1,16	AEH	FPmed < 2,4 x Fpref
Estado 3	1,17 - 1,20	AEH	FPmed < 2,5 x Fpref
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>1,2 - 1,5</b>	<b>AEH</b>	<b>FPmed &lt; 2,7 x Fpref</b>
Estado 1	1,2 - 1,3	AEH	FPmed < 2,6 x Fpref
Estado 2	1,4 - 1,5	AEH	FPmed < 2,7 x Fpref
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>1,6 - 1,7</b>	<b>AEH</b>	<b>FPmed &gt; 2,9 x Fpref</b>
Estado 1	1,60 - 1,65	AEH	FPmed > 2,8 x Fpref
Estado 2	≥ 1,7	AEH	FPmed < 2,9 x Fpref

Onde: PFmed é o resultado do ensaio e FPref é o valor de placa ou de comissionamento

Fonte: [93]

#### 5.4.5 Critérios de capacitância

Da mesma forma, a tabela 5.14 mostra o critério de interpretação para as medidas de capacitância de reatores a óleo, podendo-se observar dois critérios bem definidos de análise, sendo:

- **Medida com variação de frequência entre 15 e 400 Hz:** análise realizada de acordo com a assinatura obtida com os valores de capacitância medidos em várias frequências.
- **Varição CAPref:** análise realizada com a comparação da capacitância medida em 60 Hz com a capacitância de referência do reator (valor de placa ou de comissionamento).

**Tabela 5.14:** Critérios de interpretação de capacitância em reatores

Estágio / Estado	Capacitância	
	Medida entre 15 - 400 Hz (%)	Variação CAPref
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b><math>\Delta C(f) \leq 0,5</math></b>	<b><math>\Delta C &lt; 5\%</math></b>
Estado 1	$\Delta C(f) \leq 0,5 \%$	$\Delta C < 5\%$
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b><math>0,5 \% &lt; \Delta C(f) \leq 1 \%</math></b>	<b><math>5\% &lt; \Delta C &lt; 10\%</math></b>
Estado 1	$0,5 \% < \Delta C(f) \leq 0,6 \%$	$5\% < \Delta C < 7\%$
Estado 2	$0,6 \% < \Delta C(f) \leq 8 \%$	$7\% < \Delta C < 9\%$
Estado 3	$0,8 \% < \Delta C(f) \leq 1 \%$	$9\% < \Delta C < 10\%$
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b><math>1 \% &lt; \Delta C(f) \leq 1,2 \%</math></b>	<b><math>10\% &lt; \Delta C &lt; 15\%</math></b>
Estado 1	$1 \% < \Delta C(f) \leq 1,13 \%$	$10\% < \Delta C < 12\%$
Estado 2	$1,13 \% < \Delta C(f) \leq 1,16 \%$	$12\% < \Delta C < 13\%$
Estado 3	$1,16 \% < \Delta C(f) \leq 1,2 \%$	$13\% < \Delta C < 15\%$
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b><math>1,2 \% &lt; \Delta C(f) \leq 1,5 \%</math></b>	<b><math>15\% &lt; \Delta C &lt; 19\%</math></b>
Estado 1	$1,2 \% < \Delta C(f) \leq 1,3 \%$	$15\% < \Delta C < 17\%$
Estado 2	$1,3 \% < \Delta C(f) \leq 1,5 \%$	$17\% < \Delta C < 19\%$
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b><math>\Delta C(f) &gt; 1,5 \%</math></b>	<b><math>\Delta C \geq 20\%</math></b>
Estado 1	$1,5 \% < \Delta C(f) \leq 1,65 \%$	$19\% < \Delta C < 20\%$
Estado 2	$\Delta C(f) > 1,65$	$\Delta C \geq 20\%$

Onde:  $\Delta C(f)$  é a variação entre as capacitâncias medidas no intervalo de 15 a 400 Hz;  
 $\Delta C$  é a variação entre CAPref (valor de placa ou de comissionamento) e CAPmed (valor medido)

Fonte: [93]

#### 5.4.6 Critérios de resistência de ôhmica

A tabela 5.15 mostra os critérios de interpretação para os resultados dos testes de resistência de ôhmica de enrolamento de reatores a óleo.

**Tabela 5.15:** Critérios de interpretação de resistência ôhmica de enrolamento

Estágio / Estado	Resistência Ôhmica
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b><math>R_{Omed} \leq R_{Oref} + 2,5\%</math></b>
Estado 1	$R_{Omed} \leq R_{Oref} + 2,5\%$
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b><math>R_{Oref} + 2,5\% &lt; R_{Omed} \leq R_{Oref} + 3,5\%</math></b>
Estado 1	$R_{Oref} + 2,5\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 2,8\%$
Estado 2	$R_{Oref} + 2,8\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 3,1\%$
Estado 3	$R_{Oref} + 3,1\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 3,5\%$
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b><math>1,035 R_{Oref} &lt; R_{Omed} \leq 1,050 R_{Oref}</math></b>
Estado 1	$R_{Oref} + 3,5\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 4,0\%$
Estado 2	$R_{Oref} + 4,0\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 4,5\%$
Estado 3	$R_{Oref} + 4,5\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 5,0\%$
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b><math>1,050 R_{Oref} &lt; R_{Omed} \leq 1,060 R_{Oref}</math></b>
Estado 1	$R_{Oref} + 5,0\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 5,5\%$
Estado 2	$R_{Oref} + 5,5\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 6,0\%$
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b><math>R_{Omed} &gt; 1,060 R_{Oref}</math></b>
Estado 1	$R_{Oref} + 6,0\% < R_{Omed} \leq R_{Oref} + 6,5\%$
Estado 2	$R_{Omed} > R_{Oref} + 6,5\%$

Onde:  $R_{Oref}$  - Valor de comissionamento  
 $R_{Omed}$  - Valor medido no ensaio

Fonte: Autoria própria

#### 5.4.7 Critérios de resistência de isolamento DC

Com base no critério kV + 1, e segundo a autora, a tabela 5.16 mostra o critério de interpretação para os resultados dos testes de resistência de isolamento DC de reatores medidos em 1 minuto.

**Tabela 5.16:** Critérios de interpretação de resistência de isolamento DC

<b>Estágio / Estado</b>	<b>Resistência de Isolamento (MΩ)</b>
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>≥ 601</b>
Estado 1	≥ 601
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>600 – 501</b>
Estado 1	601 – 568
Estado 2	567 – 535
Estado 3	534 – 501
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>500 – 451</b>
Estado 1	500 – 485
Estado 2	484 – 469
Estado 3	468 – 451
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>450 – 401</b>
Estado 1	450 – 425
Estado 2	424 – 401
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>400 – 350</b>
Estado 1	400 – 350
Estado 2	< 350

Fonte: Autoria própria

Além da análise dos valores medidos em 1 minuto a avaliação da resistência de isolamento DC é feita com base na análise da curva gerada pelos valores de resistência em função do tempo. De acordo com a figura 4.12, um crescimento contínuo na resistência indica boa isolação, em contrapartida, uma curva uniforme ou decrescente indica isolação degradada.

#### 5.4.8 Critérios do índice de absorção

A tabela 5.17 mostra o critério de interpretação para os resultados do índice de absorção de reatores.

**Tabela 5.17:** Critérios de interpretação do índice de absorção

<b>Estágio / Estado</b>	<b>Índice de Absorção</b>
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>&gt; 1,6</b>
Estado 1	> 1,6
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>1,25 - 1,6</b>
Estado 1	1,4 - 1,6
Estado 2	1,3 - 1,4
Estado 3	1,25 - 1,3
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>1,1 - 1,25</b>
Estado 1	1,2 - 1,25
Estado 2	1,15 - 1,2
Estado 3	1,1 - 1,15
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>1 - 1,1</b>
Estado 1	1,05 - 1,1
Estado 2	1 - 1,05
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>0 - 1</b>
Estado 1	0,5 - 1
Estado 2	0 - 0,5

Fonte: Autoria própria

#### 5.4.9 Critérios do índice de polarização

A tabela 5.18 mostra o critério de interpretação para os resultados do índice de polarização de reatores.

**Tabela 5.18:** Critérios de interpretação do índice de polarização

<b>Estágio / Estado</b>	<b>Índice de Polarização</b>
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>&gt; 4</b>
Estado 1	> 4
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>2 - 4</b>
Estado 1	3 - 4
Estado 2	2,5 - 3
Estado 3	2 - 2,5
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>1,5 - 2</b>
Estado 1	1,8 - 2
Estado 2	1,6 - 1,8
Estado 3	1,5 - 1,6
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>1 - 1,5</b>
Estado 1	1,25 - 1,5
Estado 2	1 - 1,25
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>0 - 1</b>
Estado 1	0,5 - 1
Estado 2	0 - 0,5

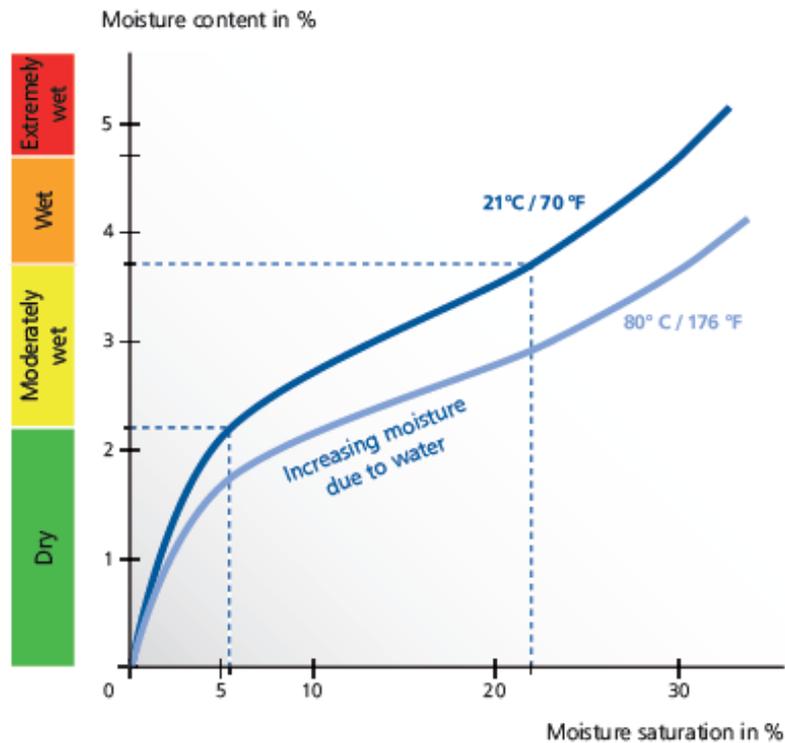
Fonte: Autoria própria

#### 5.4.10 Critérios para análise da resposta do dielétrico

A avaliação da resposta do dielétrico é feita com base em uma curva modelo, semelhante à apresentada na figura 4.24. A curva modelo leva em consideração a

geometria do equipamento (modelo XY) e a temperatura do óleo no momento da execução do ensaio. E a classificação do teor de umidade na celulose é realizada de acordo com a correlação “conteúdo de umidade x saturação da umidade” conforme mostra a figura 5.6.

**Figura 5.6:** Classificação do teor de umidade



Fonte: [99]

De acordo com os resultados calculados, as isolações líquida e sólida são classificadas segundo a tabela 5.19, a seguir.

**Tabela 5.19:** Critérios de interpretação para a isolação sólida

Classificação	Teor de umidade da celulose	Avaliação DIRANA
Novo	<2,2%	Seco
Normal	≥2,2% e <3,7%	Moderadamente úmido
Defeituoso	≥3,7% e <4,8%	Úmido
Falhado	≥4,8%	Extremamente úmido

Fonte: [99]

#### 5.4.11 Critérios para análise da resposta em frequência

Conforme descrito no capítulo 4, a avaliação da resposta em frequência é dividida em três faixas de frequência – baixa, média e alta -, conforme mostrado na figura 4.35.

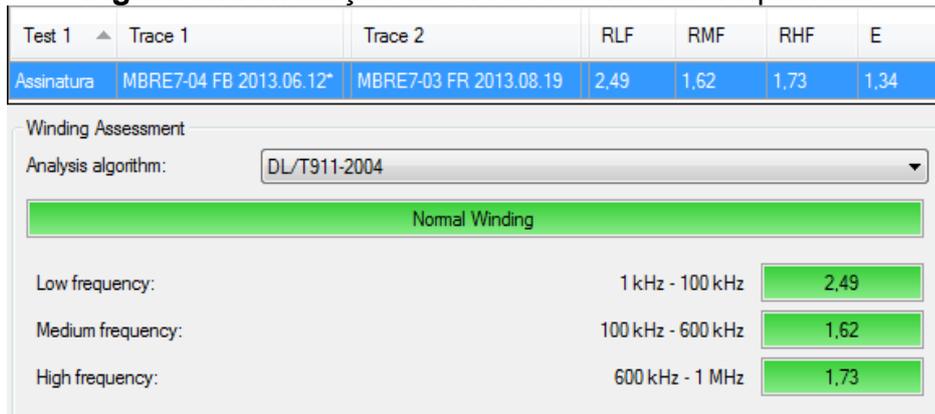
Nas médias frequências, 1kHz a 1MHz, a avaliação é feita com base na norma DL/T911-2004, conforme mostra a tabela 5.20 e figura 5.7, e indica modificações na geometria, abertura e curtos circuitos nos enrolamentos.

**Tabela 5.20:** Avaliação de enrolamentos de acordo com a norma DL/T911-2004

Classificação	Fator de avaliação do enrolamento	Grau de deformação do enrolamento
Novo	$RLF \geq 2,0$ E $RMF \geq 1,0$ E $RHF \geq 0,6$	Enrolamento normal
Normal	$2,0 > RLF \geq 1,0$ OU $0,6 \leq RMF < 1,0$	Deformação Leve
Anormal	$1,0 > RLF \geq 0,6$ OU $RMF < 0,6$	Deformação Óbvia
Falhado	$RLF < 0,6$	Deformação Severa

Fonte: [100]

**Figura 5.7:** Avaliação de SFRA em médias frequências



Fonte: [100]

A avaliação do núcleo nas baixas frequências e das conexões nas altas frequências é realizada com base em comparações e no conhecimento do especialista humano (AEH).

#### 5.4.12 Critérios para impedância terminal

Assim como na análise de resposta em frequência, a avaliação de impedância terminal é feita com base em comparações e no conhecimento do especialista humano (AEH), onde são analisadas as curvas de impedância: Parte real, Parte imaginária, Magnitude e Fase.

#### 5.4.13 Critérios de vibração e ruído

A avaliação do ruído e vibração em reatores é realizada de acordo com os valores limites estabelecidos na tabela 5.21, a seguir.

**Tabela 5.21:** Critérios de interpretação para vibração e ruído

Estágio / Estado	Vibração ( $\mu\text{m}$ pico)	Ruído (dB)
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>&lt; 80</b>	<b>&lt; 65</b>
Estado 1	< 80	< 65
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>80 - 85</b>	<b>65 - 70</b>
Estado 1	80 - 81	65 - 66
Estado 2	82 - 83	67 - 68
Estado 3	84 - 85	69 - 70
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>86 - 91</b>	<b>71 - 76</b>
Estado 1	86 - 87	71 - 72
Estado 2	88 - 89	73 - 74
Estado 3	90 - 91	75 - 76
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>92 - 94</b>	<b>77 - 80</b>
Estado 1	92 - 93	77 - 78
Estado 2	93 - 94	79 - 80
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>&gt; 94</b>	<b>&gt; 80</b>
Estado 1	94 - 96	81 - 82
Estado 2	> 97	> 83

Fonte: Autoria própria

#### 5.4.14 Critérios para avaliação do carregamento

A avaliação do carregamento de reatores é realizada de acordo com os valores de carregamento medidos num período de seis meses, conforme detalhado na tabela 5.22.

**Tabela 5.22:** Critérios de interpretação para as curvas de carregamento

Estágio / Estado	Carregamento
<b>Estágio 1: Novo</b>	<b>&lt; 80% <math>C_{\text{NOM}}</math></b>
Estado 1	< 80% $C_{\text{NOM}}$
<b>Estágio 2: Normal</b>	<b>&lt; 90% <math>C_{\text{NOM}}</math></b>
Estado 1	< 81% $C_{\text{NOM}}$
Estado 2	< 86% $C_{\text{NOM}}$
Estado 3	< 90% $C_{\text{NOM}}$
<b>Estágio 3: Anormal</b>	<b>&lt; 110% <math>C_{\text{NOM}}</math></b>
Estado 1	< 91% $C_{\text{NOM}}$
Estado 2	< 100% $C_{\text{NOM}}$
Estado 3	< 110% $C_{\text{NOM}}$
<b>Estágio 4: Defeituoso</b>	<b>&lt; 120% <math>C_{\text{NOM}}</math></b>
Estado 1	< 111% $C_{\text{NOM}}$
Estado 2	< 120% $C_{\text{NOM}}$
<b>Estágio 5: Falhado</b>	<b>&lt; 130% <math>C_{\text{NOM}}</math></b>
Estado 1	< 121% $C_{\text{NOM}}$
Estado 2	< 130% $C_{\text{NOM}}$

Onde:  $C_{\text{NOM}}$  é valor de carregamento nominal definido em projeto.

Fonte: Autoria própria

Neste capítulo foi apresentada a metodologia de avaliação da condição, a ferramenta que será utilizada nesta dissertação para a gestão do ciclo de vida em reatores, com todos os critérios de avaliação utilizados pelos catorze agentes selecionados.

No capítulo a seguir serão avaliados com a metodologia proposta os ciclos de vida de dez reatores do sistema de transmissão do Pará da Eletrobras-Eletronorte.

## 6 Aplicação da metodologia da avaliação da condição em reatores

### 6.1 Caracterização dos reatores

A metodologia proposta no capítulo 5 será exemplificada através do estudo de caso em dez reatores de fabricação Jeumont Schneider com tensão de 525 kV e potência aparente de 50 / 60 MVA instalados em duas subestações da Regional de Transmissão do Pará da Eletrobras-Eletronorte, conforme detalhamento realizado na tabela 6.1.

**Tabela 6.1:** Reatores de 525 kV avaliados

Subestação	Ano	Potência	Código
Marabá	1980	50 MVA	Reator 01
			Reator 02
			Reator 03
	1987		Reator 04
			Reator 05
			Reator 06
			Reator 07
Vila do Conde	1980	60 MVA	Reator 08
			Reator 09
			Reator 10

Fonte: Autoria própria

Neste capítulo serão apresentados os resultados detalhados da avaliação de dois destes dez reatores por cada um dos catorze agentes selecionados, apresentados no capítulo 5. Entretanto a determinação do Índice da Condição, detalhado na figura 5.3, será realizada para cada um dos dez reatores para assim ilustrar a viabilidade e robustez do modelo proposto.

Os reatores cujos resultados serão detalhados são o Reator 07 de 50 MVA da subestação de Marabá e o Reator 10 de 60 MVA da subestação de Vila do Conde.

### 6.2 Avaliação físico-química

As tabelas 6.2 e 6.3 apresentam os resultados das avaliações físico-químicas nos dois reatores selecionados, com a indicação do estado de cada item avaliado, com base na tabela 5.9. As medições foram realizadas anualmente no período de 2000 a 2014.

**Tabela 6.2:** Histórico físico-químico do Reator 07

Data da Coleta	Ind. Neutralização (Mg KOH/g)	Rigidez Dielétrica (KV)		Fator de Potência		Tensão Interfacial (Dinas/cm)	Teor de Água (PPM)
		Disco	Calota	25°C (%)	100°C (%)		
03/05/2000	0,06	41	-	0,015	2,3	27	2
22/09/2001	0,0561	55	-	0,04	0,9	36	8
22/04/2002	0,028	58	-	0,031	1,1	34	1
14/10/2003	-	50	-	0,023	0,893	30	2
11/11/2004	-	55,6	-	0,01	0,84	30	1
27/10/2005	0,0064	65,8	-	0,013	0,583	32,8	1
11/03/2006	0,0172	60,1	-	0,034	1,434	33,6	1
04/10/2007	0,0134	53,5	-	0,035	0,682	33,3	6
21/10/2008	0,009	-	100,0	0,035	0,708	33,4	10
21/10/2009	0,016	-	94,4	0,033	0,639	33,8	3
28/10/2010	0,015	-	92,6	0,041	0,788	33,6	9
28/10/2011	0,02	-	98,1	0,035	1,117	34,0	8
30/10/2012	0,01	-	99,3	0,039	0,952	30,6	7
15/10/2013	0,02	-	94,1	0,035	0,8481	31,9	3

Fonte: [101]

**Tabela 6.3:** Histórico físico-químico do Reator 10

Data da Coleta	Ind. Neutralização (Mg KOH/g)	Rigidez Dielétrica (KV)		Fator de Potência		Tensão Interfacial (Dinas/cm)	Teor de Água (PPM)
		Disco	Calota	25°C (%)	100°C (%)		
09/05/2000	0,027	44	-	0,085	5,000	38	2
07/03/2001	0,02	56	-	0,013	0,770	31	1
11/05/2002	0,028	57	-	0,124	4,700	31	-
30/06/2003	0,0112	61	-	0,052	2,953	30	3
14/01/2004	0,0055	47	-	0,074	2,689	28	16
06/04/2005	0,0327	62,5	-	0,063	3,323	35	5
30/03/2006	0,132	62,9	-	0,016	1,289	34,2	-
19/03/2007	0,0105	61,8	-	0,068	1,976	34,5	19
04/04/2008	0,0147	54,1	-	0,102	2,081	34,7	18
07/04/2009	0,011	-	87,3	0,055	1,976	33,4	7
13/04/2010	0,018	-	94,4	0,055	1,882	34,2	7
12/04/2011	0,016	-	90,1	0,054	1,527	35,0	9
19/04/2012	0,01	-	90,7	0,075	2,794	31,9	13
16/04/2013	0,02	-	77,0	0,082	2,257	30,7	11
10/04/2014	0,01	-	95,8	0,100	2,890	30,6	19

Fonte: [101]

### 6.3 Avaliação gascromatográfica

As tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os resultados das avaliações gascromatográficas nos dois reatores selecionados, realizadas no período de 2000 a 2014, com a indicação do estado de cada gás avaliado com base na tabela 5.10.

**Tabela 6.4:** Histórico gascromatográfico do Reator 07

Data da Coleta	H <sub>2</sub> (PPM)	CH <sub>4</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (PPM)	CO (PPM)	CO <sub>2</sub> (PPM)	Total de Gases Combustíveis
25/02/2000	< 20	58	< 1	2	42	622	8725	731
27/09/2001	< 20	91	< 1	3	41	560	8835	706
17/04/2002	< 20	115	< 1	4	72	596	9027	795
01/08/2003	< 20	124	< 1	3	48	715	5478	896
10/05/2004	< 20	97	< 1	3	72	1151	7786	1333
03/08/2004	< 20	20	< 1	< 1	6	124	2820	152
03/02/2005	< 20	5	< 1	< 1	3	57	1106	67
16/11/2005	< 20	24	< 1	2	6	99	3103	135
22/02/2006	< 20	16	< 1	4	6	221	1687	252
28/08/2006	< 20	16	< 1	1	26	117	3620	161
26/04/2007	< 20	11	< 1	1	7	131	2770	156
27/11/2007	< 20	21	< 1	2	18	287	4592	333
20/06/2008	< 20	19	< 1	1	24	222	4214	275
11/12/2008	< 20	21	< 1	2	13	439	6421	477
03/06/2009	< 20	20	< 1	1	10	303	3661	338
17/12/2009	< 20	27	< 1	< 1	17	370	5386	418
17/06/2010	< 20	28	< 1	5	38	282	5488	360
07/12/2010	< 20	30	< 1	5	29	349	6674	413
10/06/2011	< 20	30	< 1	5	28	376	6899	439
15/12/2011	< 20	42	< 1	5	50	383	7106	480
15/10/2012	< 20	6	< 1	< 1	3	54	2135	63
12/12/2012	< 20	9	< 1	1	7	97	3481	114
05/06/2013	1363	3807	11	5919	1553	184	4552	12837
06/06/2013	1764	4785	12	7508	1933	197	4718	16199
08/06/2013	1874	4933	16	7570	1957	206	4738	16556
18/11/2013	1654	5214	6	7204	1935	208	2288	16221
20/12/2013	1395	4551	5	6673	1825	174	2669	14623
05/02/2014	212	990	1	1615	463	89	933	3370
11/06/2014	< 20	86	< 1	183	29	82	861	380

Fonte: [101]

Observa-se na tabela 6.4 que em 2013 as amostras de óleo começaram a apresentar níveis altíssimos de gases combustíveis, e que os níveis do gás acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) passaram de indetectáveis para 11.

Apesar deste gás ser classificado como normal, pela tabela 5.10, a tabela 4.13 o aponta como gás chave de indicação de defeitos de arco interno. E por este motivo o reator 07 foi retirado de operação em meados de junho/2013, a partir de onde se observa a redução dos níveis de gases combustíveis.

**Tabela 6.5:** Histórico gascromatográfico do Reator 10

Data da Coleta	H <sub>2</sub> (PPM)	CH <sub>4</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (PPM)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (PPM)	CO (PPM)	CO <sub>2</sub> (PPM)	Total de Gases Combustíveis
07/03/2001	< 20	32	< 1	2	109	123	4489	271
11/05/2002	< 20	7	< 1	1	81	68	5020	159
30/06/2003	< 20	60	< 1	5	107	113	2995	294
09/12/2003	< 20	97	< 1	10	160	187	4638	464
14/01/2004	< 20	48	< 1	8	74	93	2883	229
14/07/2004	< 20	85	< 1	7	121	179	4105	403
11/01/2005	< 20	89	< 1	17	155	179	3329	458
18/07/2005	< 20	74	< 1	2	130	172	3690	383
23/02/2006	< 20	88	< 1	1	109	200	3836	411
14/09/2006	< 20	104	< 1	2	166	226	5396	505
19/03/2007	< 20	84	< 1	2	134	183	4291	415
20/09/2007	< 20	111	< 1	1	190	191	8385	496
04/04/2008	< 20	114	< 1	1	199	226	7780	559
30/10/2008	< 20	127	< 1	1	184	314	8492	629
06/05/2009	< 20	113	< 1	1	158	217	6640	491
06/11/2009	< 20	125	< 1	1	188	227	7595	543
19/05/2010	< 20	132	< 1	1	253	238	7926	631
18/11/2010	< 20	127	< 1	1	281	206	9174	614
31/05/2011	< 20	77	< 1	1	208	147	7203	432
09/01/2012	< 20	19	< 1	1	43	48	2412	110
27/09/2012	< 20	92	< 1	4	313	85	4842	494
18/02/2013	< 20	56	< 1	1	96	98	4100	250
12/09/2013	< 20	93	< 1	4	245	123	3546	465
14/05/2014	< 20	89	< 1	6	317	104	2242	516

Fonte: [101]

#### 6.4 Avaliação furfuraldeído

A tabela 6.6 apresenta os resultados das avaliações de furfuraldeído nos dois reatores, realizadas no período de 2004 a 2013, com a indicação do estado de cada medição com base na tabela 5.11.

No entanto, neste período todos os reatores passaram por manutenções e tiveram seu óleo mineral isolante tratado. No processo de tratamento do óleo, o teor de furfuraldeído é alterado significativamente, perdendo-se o referencial de antes do tratamento, que só é reestabelecido depois de um período após o tratamento.

**Tabela 6.6:** Histórico furfuraldeído dos Reatores 07 e 10

Equipamento	Data da Coleta	Teor de Furfuraldeído (PPM)	GP <sub>FUR</sub>	Idade <sub>FUR</sub>	Diagnóstico
Reator 07	28/05/2013	0,08	680	16 anos	Envelhecimento normal - 25 anos de operação
Reator 10	15/12/2004	0,00	1200	Novo	Resultado normal
	12/12/2005	0,20	610	18 anos	Envelhecimento normal - 24 anos de operação
	13/12/2006	0,50	550	20 anos	Envelhecimento normal - 25 anos de operação
	12/12/2007	0,70	505	21 anos	Envelhecimento normal - 26 anos de operação
	04/12/2008	0,26	580	19 anos	Envelhecimento normal - 27 anos de operação
	02/12/2009	0,04	740	14 anos	Envelhecimento normal - 28 anos de operação
	09/12/2010	0,04	740	14 anos	Envelhecimento normal - 29 anos de operação
	29/11/2011	0,03	770	13 anos	Envelhecimento normal - 30 anos de operação
	04/12/2012	0,00	1200	Novo	Resultado normal
	19/11/2013	0,04	740	14 anos	Envelhecimento normal - 32 anos de operação

Fonte: [101]

### 6.5 Avaliação do fator de potência e capacitância

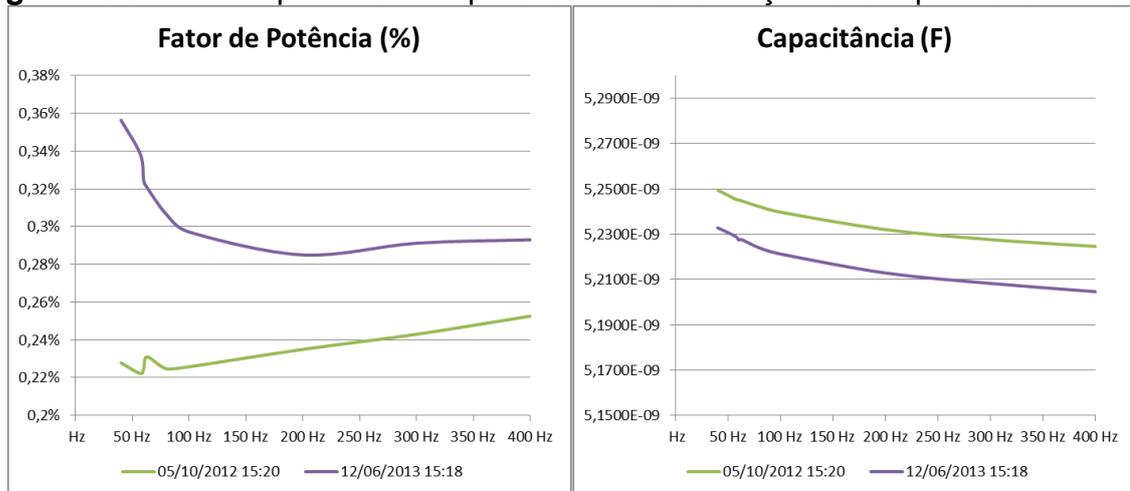
A tabela 6.7 apresenta os resultados das avaliações de fator de potência e capacitância em 60 Hz nos dois reatores, realizadas no período de 2012 a 2014, com a indicação do estado de cada medição com base nas tabelas 5.12 e 5.13.

**Tabela 6.7:** Histórico de fator de potência e capacitância de reatores

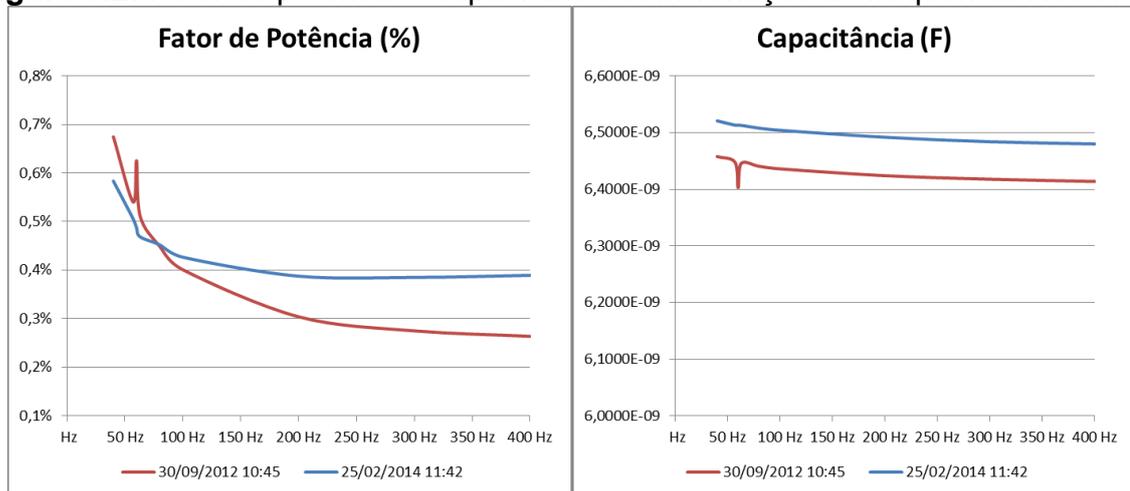
Reator	Data da análise	Fator de potência (%)		Capacitância (pF)	
		Referência	Medido	Referência	Medido
Reator 07	05.10.2012	0,29	0,2249	5.135	5.245,08
	12.06.2013	0,29	0,3242	5.135	5.227,45
Reator 10	30.09.2012	0,30	0,5118	6.413	6.445,70
	25.02.2014	0,30	0,4688	6.413	6.512,66

Fonte: Autoria própria

As figuras 6.1 e 6.2 apresentam os resultados das avaliações de fator de potência e capacitância com variação de frequência de 40 a 400 Hz nos dois reatores, realizadas no período de 2012 a 2014. Nestas observa-se que o fator de potência tanto Reator 07 quanto do Reator 10 teve uma piora de 2012 para 2013.

**Figura 6.1:** Fator de potência e capacitância com variação de frequência Reator 07

Fonte: Autoria própria

**Figura 6.2:** Fator de potência e capacitância com variação de frequência Reator 10

Fonte: Autoria própria

## 6.6 Avaliação de resistência ôhmica

A tabela 6.8 apresenta os resultados das avaliações de resistência ôhmica dos dois reatores, realizadas no período de 2013 e 2014, com a indicação do estado de cada medição com base na tabela 5.14.

**Tabela 6.8:** Resistência ôhmica de reatores

Data da análise	Reator	Resistência Ôhmica ( $\Omega$ )		Critério da Tabela 5.15
		ROref	ROmed	
12.06.2013	Reator 07	3,5870	3,6337	ROmed=ROref + 1,3%
25.02.2014	Reator 10	2,7239	2,6370	ROmed=ROref – 3,2%

Fonte: Autoria própria

## 6.7 Avaliação da resistência de isolamento DC

A tabela 6.9 apresenta os resultados das medições de resistência de isolamento DC dos dois reatores, realizadas no período de 2013 e 2014.

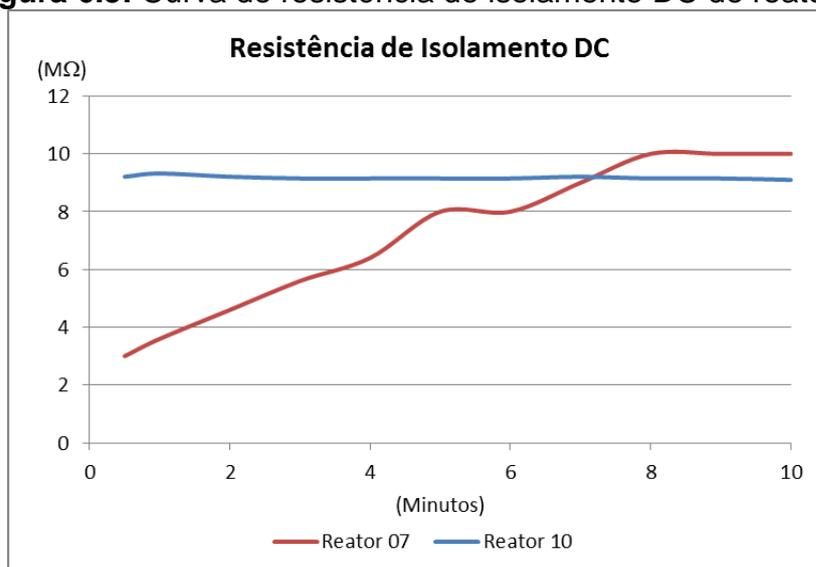
**Tabela 6.9:** Resistência de isolamento DC de reatores

Reator	Data da análise	Resistência de Isolamento DC (GΩ)											
		Ref.: 1 min	30 seg	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
Reator 07	12.06.2013	1,69	3,00	3,60	4,60	5,60	6,40	8,00	8,00	9,00	10,00	10,00	10,00
Reator 10	25.02.2014	2,25	9,21	9,32	9,21	9,15	9,15	9,15	9,15	9,21	9,15	9,15	9,10

Fonte: Autoria própria

A figura 6.3 apresenta o gráfico dos resultados das avaliações de resistência de isolamento DC dos dois reatores. Observa-se que a isolação do Reator 10 encontra-se comprometida, segundo a curva de comportamento típico de resistência de isolamento DC definida pelo Cigré, e mostrada na figura 4.12.

**Figura 6.3:** Curva de resistência do isolamento DC de reatores



Fonte: Autoria própria

## 6.8 Avaliação dos índices de absorção e polarização

A tabela 6.10 apresenta os resultados das avaliações dos índices de absorção e polarização, respectivamente, dos dois reatores, realizadas no período de 2013 e 2014, com a indicação do estado de cada medição com base na tabela 5.16.

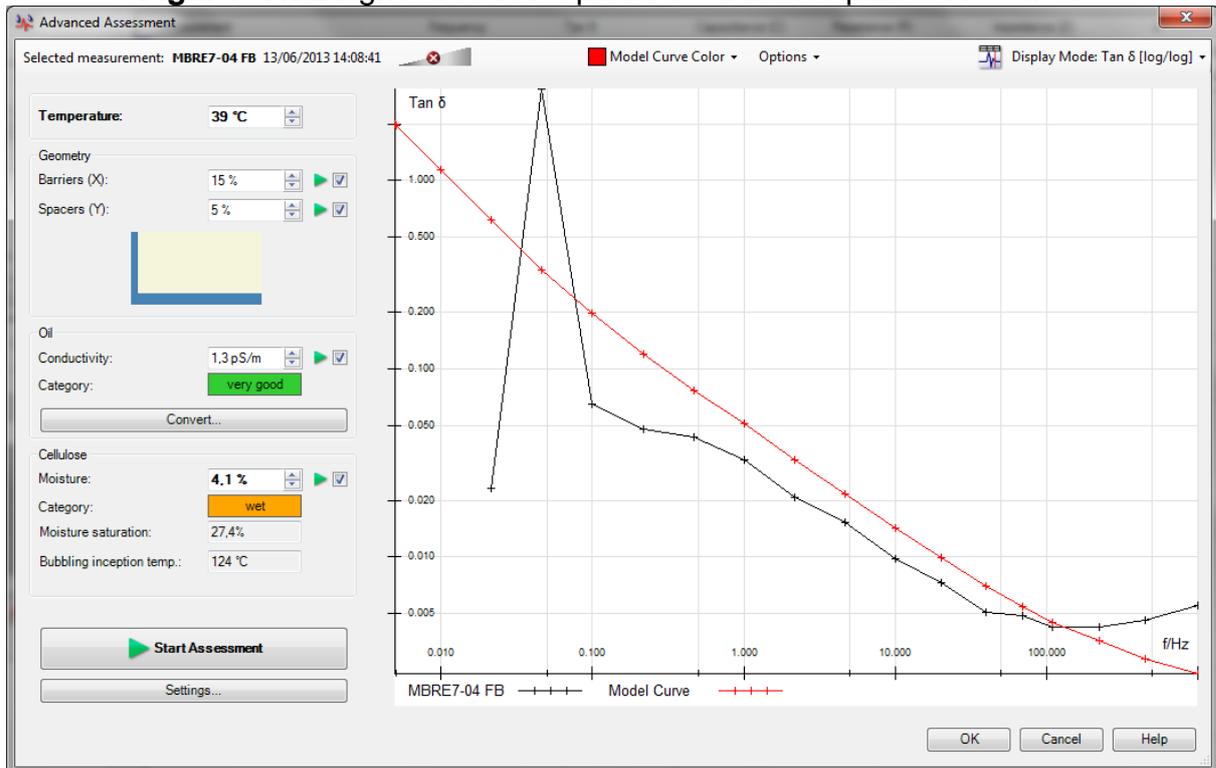
**Tabela 6.10:** Índices de Absorção e Polarização dos reatores

Data da análise	Reator	Índice de Absorção	Índice de Polarização
12.06.2013	Reator 07	1,20	2,77
25.02.2014	Reator 10	1,01	0,98

Fonte: Autoria própria

## 6.9 Avaliação da análise da resposta do dielétrico

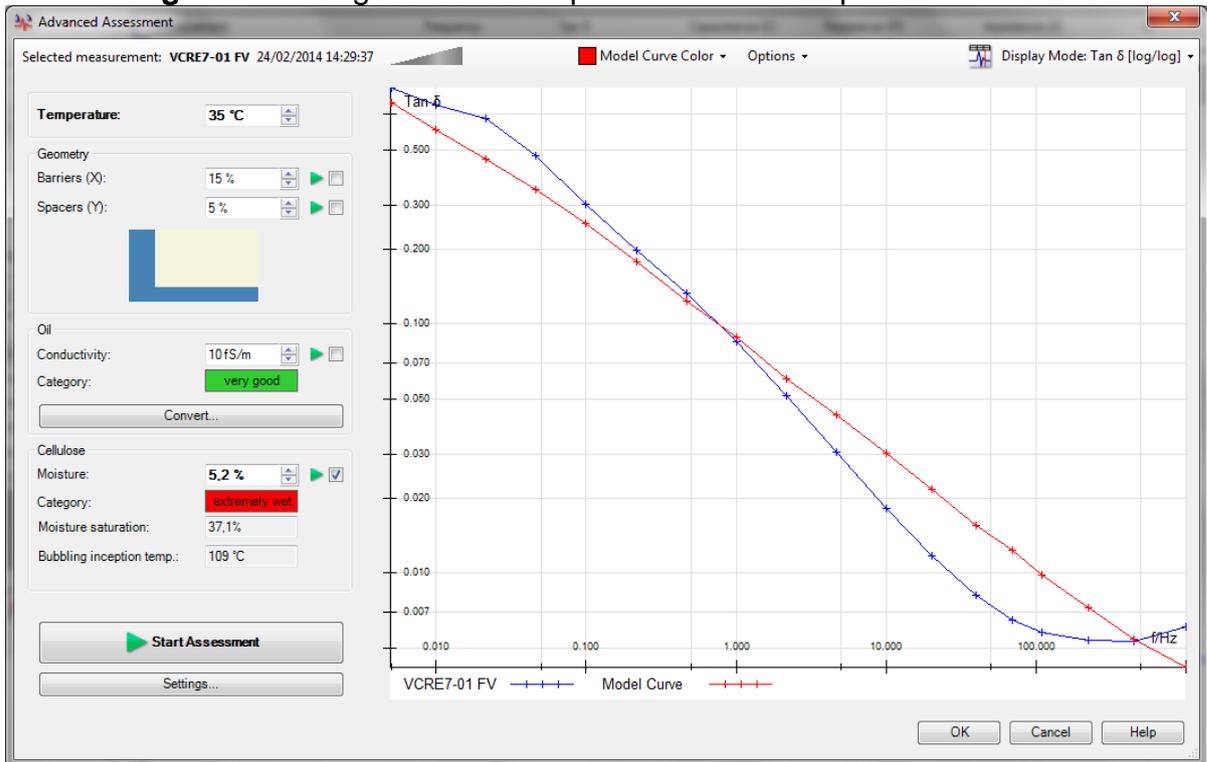
A figura 6.4 apresenta o diagnóstico da resposta do dielétrico para o Reator 07. A curva medida (em preto) quando comparada com a curva padrão (em vermelho) diagnosticou o equipamento como úmido, com um teor de umidade da celulose de 4,1%.

**Figura 6.4:** Diagnóstico da resposta do dielétrico para o Reator 07

Fonte: [99]

A figura 6.5 apresenta o diagnóstico da resposta do dielétrico para o Reator 10. A curva medida (em preto) quando comparada com a curva padrão (em vermelho) diagnosticou o equipamento como extremamente úmido, com um teor de umidade da celulose de 5,2%.

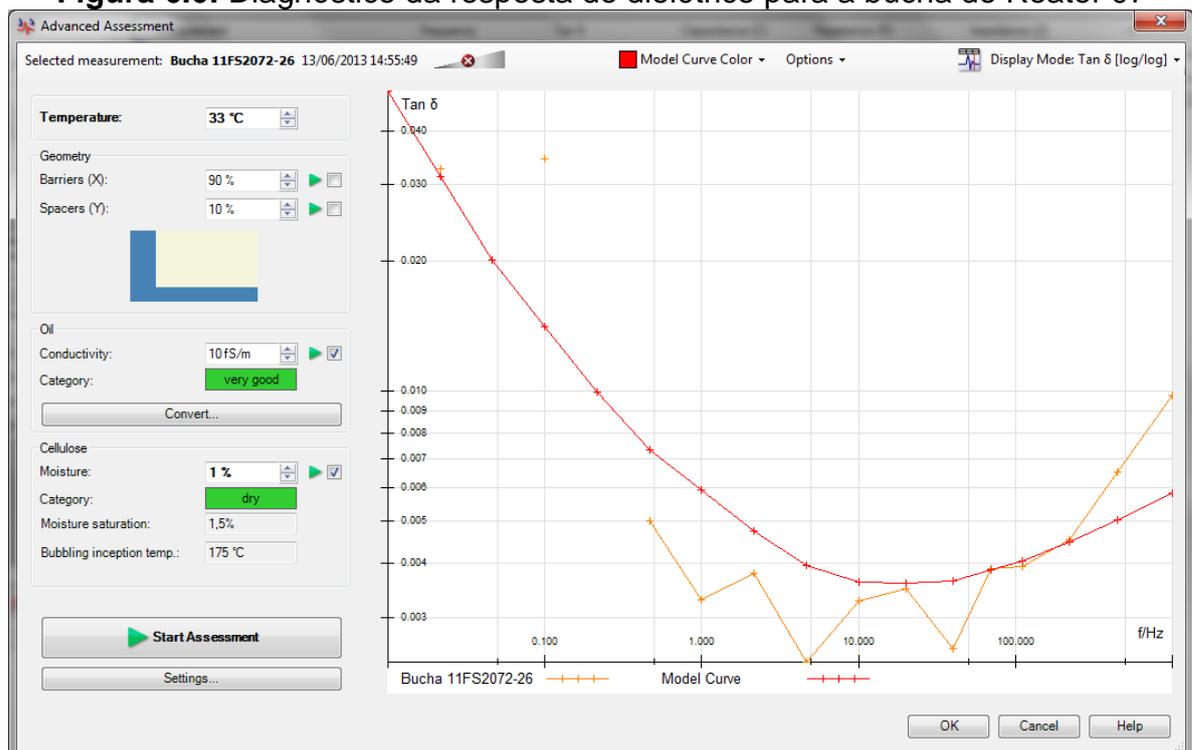
**Figura 6.5:** Diagnóstico da resposta do dielétrico para o Reator 10



Fonte: [99]

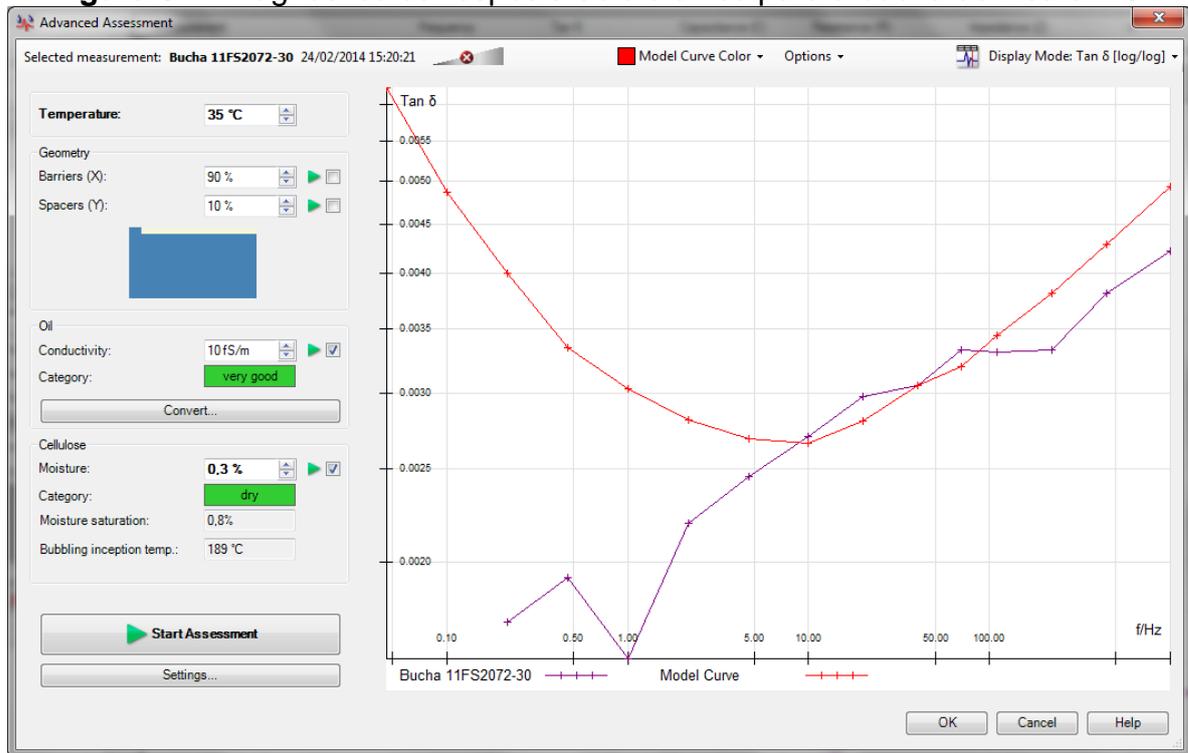
As figuras 6.6 e 6.7 apresentam o diagnóstico da resposta do dielétrico para as buchas de 500 kV do Reator 07 e Reator 10 respectivamente, onde ambas são diagnosticadas como secas.

**Figura 6.6:** Diagnóstico da resposta do dielétrico para a bucha do Reator 07



Fonte: [99]

**Figura 6.7:** Diagnóstico da resposta do dielétrico para a bucha do Reator 10



Fonte: [99]

Nas figuras 6.4 a 6.7 observa-se que além da comparação gráfica entre a curva medida e a curva modelo, são informadas as condições dos isolamentos líquido e sólido, de acordo com a tabela 5.17.

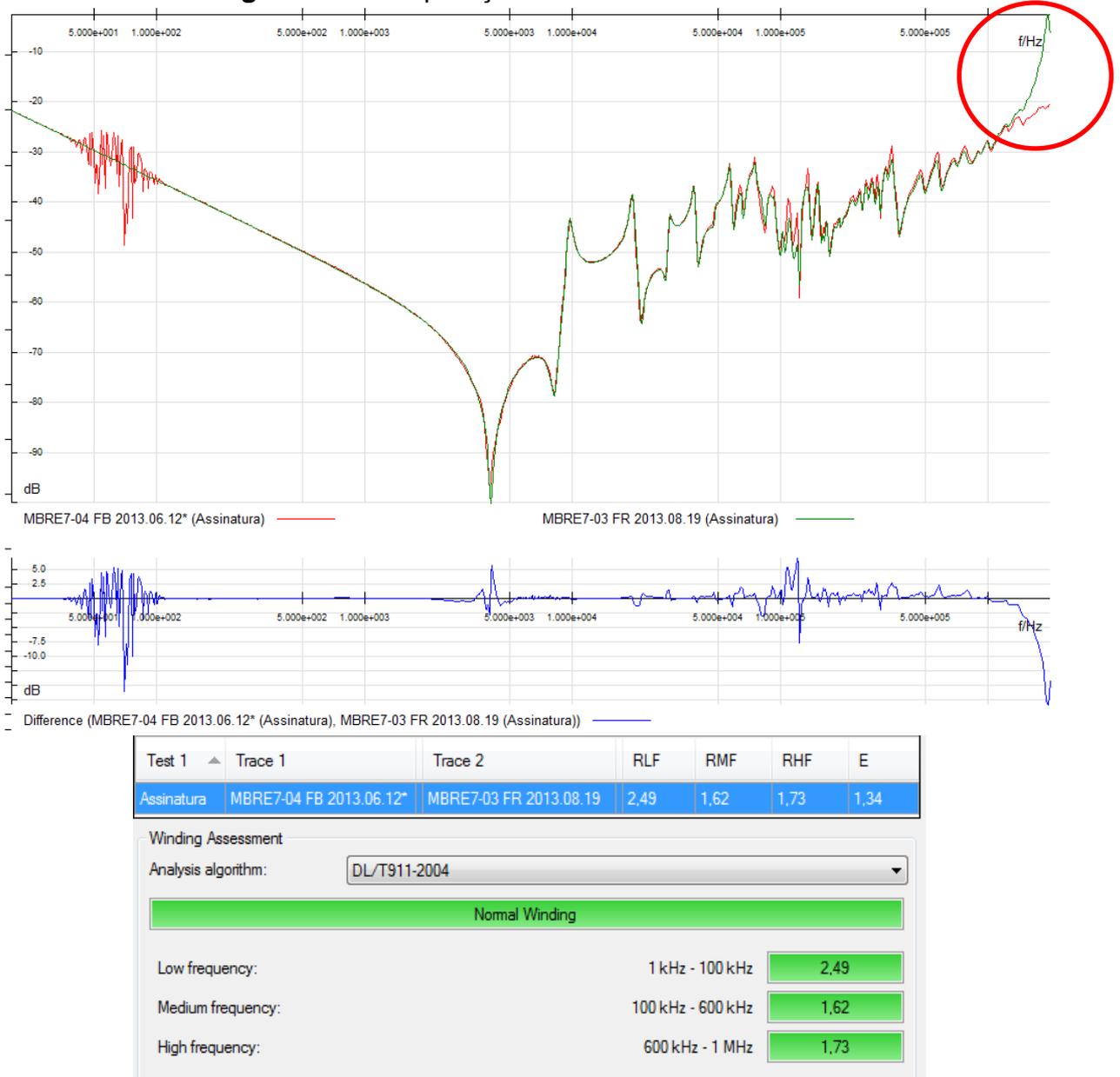
Para o óleo mineral isolante é informada ainda sua condutividade, e para a celulose são informadas a saturação da umidade, a temperatura de início de borbulhamento e o teor de umidade.

### 6.10 Avaliação da análise de resposta em frequência

As figuras 6.8 e 6.9 apresentam as comparações utilizadas para a análise de resposta em frequência do Reator 07. Onde foram utilizados reatores de mesmo projeto e ano de fabricação para efeito de comparação.

O gráfico da figura 6.8 mostra a comparação entre o Reator 06 e o Reator 07, e nesta pode-se observar que apesar das curvas se aproximarem em uma ampla faixa de frequências, na última faixa existe um distanciamento das curvas, indicando que existem divergências quanto às conexões internas dos dois equipamentos comparados.

**Figura 6.8:** Comparação entre os reatores 06 e 07



Fonte: [100]

Na figura 6.9 está a comparação entre o Reator 05 e o Reator 06, podendo-se observar que as curvas se aproximam em todas as faixas de frequências, não existindo distanciamento das curvas em nenhuma faixa, indicando que não existem divergências entre os dois equipamentos comparados e evidenciando que realmente existe um problema no Reator 07.

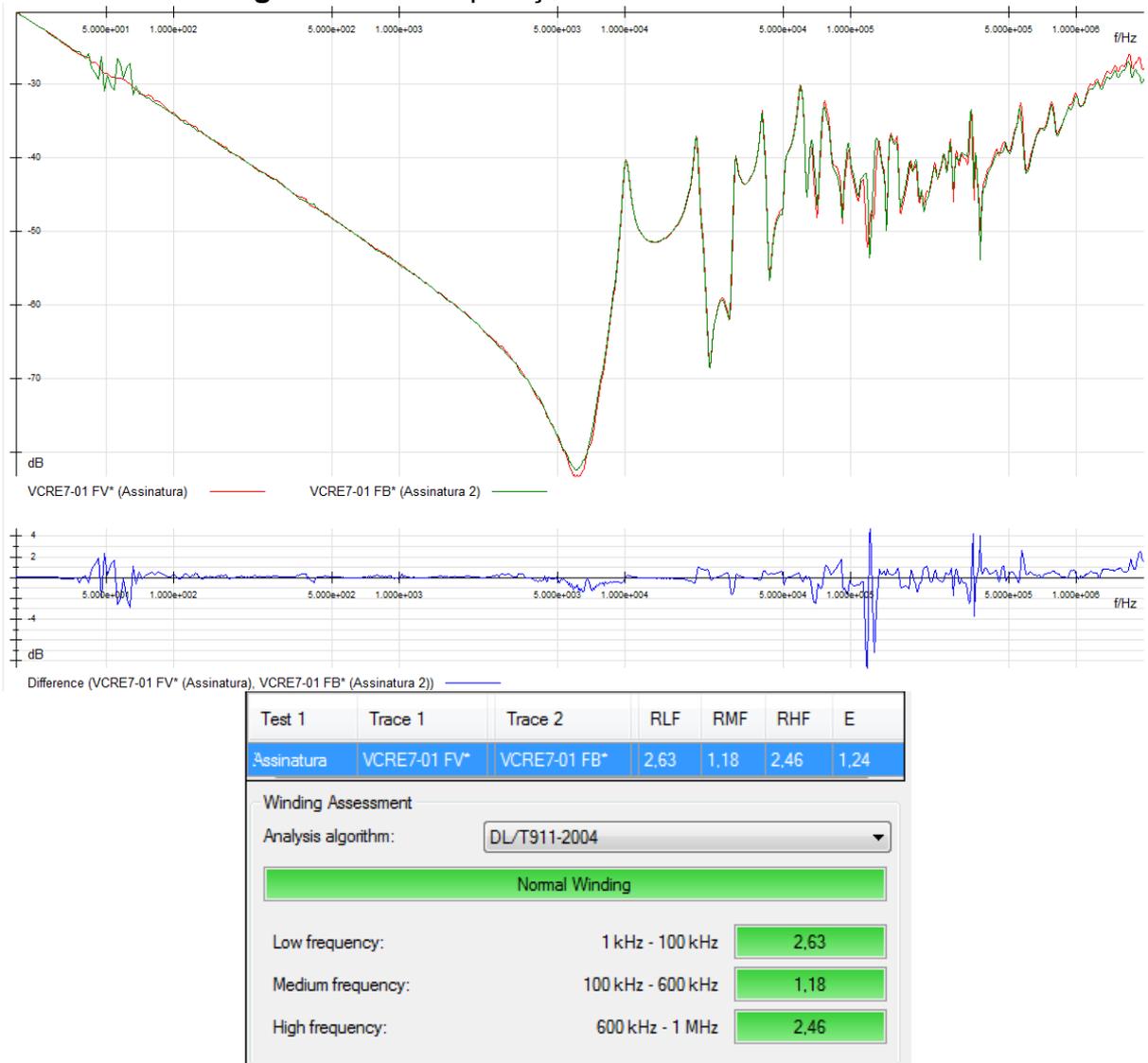
**Figura 6.9:** Comparação entre os reatores 05 e 06



Fonte: [100]

A figura 6.10 apresenta a comparação utilizada para a análise de resposta em frequência do Reator 10, onde foi utilizado o Reator 9 de mesmo projeto e ano de fabricação para efeito de comparação. Pode-se observar que as curvas se aproximam em todas as faixas de frequências, não existindo distanciamento significativo das curvas em nenhuma faixa, indicando que não existem divergências entre os dois equipamentos comparados.

**Figura 6.10: Comparação entre os reatores 09 e 10**



Fonte: [100]

Vale ressaltar que os diagnósticos realizados pela norma DL/T911-2004, mostrados nas figuras 6.8 a 6.10, referem-se a faixa de frequência de 1kHz a 1MHz, que avalia apenas o enrolamento do reator.

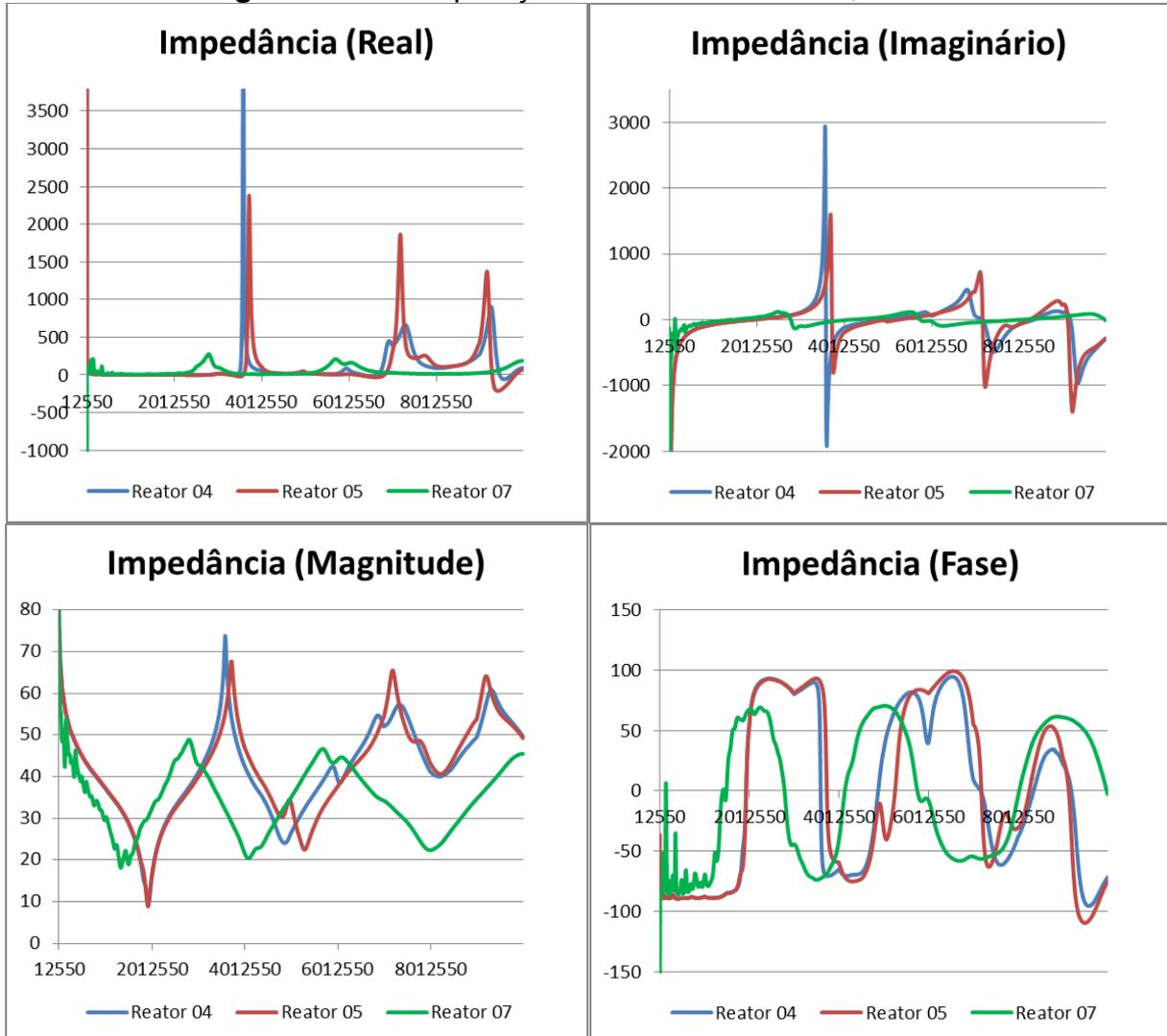
### 6.11 Avaliação da impedância terminal

A figura 6.11 apresenta a comparação utilizada para a análise de impedância terminal do Reator 07, onde foram utilizados os reatores 04 e 05 de mesmo projeto e ano de fabricação para efeito de comparação.

Pode-se observar que as ressonâncias e amplitudes dos reatores 04 e 05 são semelhantes, no entanto as ressonâncias do Reator 07 ocorrem em faixas de

frequências diferentes e têm amplitudes inferiores, indicando que existem divergências entre os três equipamentos comparados.

**Figura 6.11:** Comparação entre os reatores 04, 05 e 07

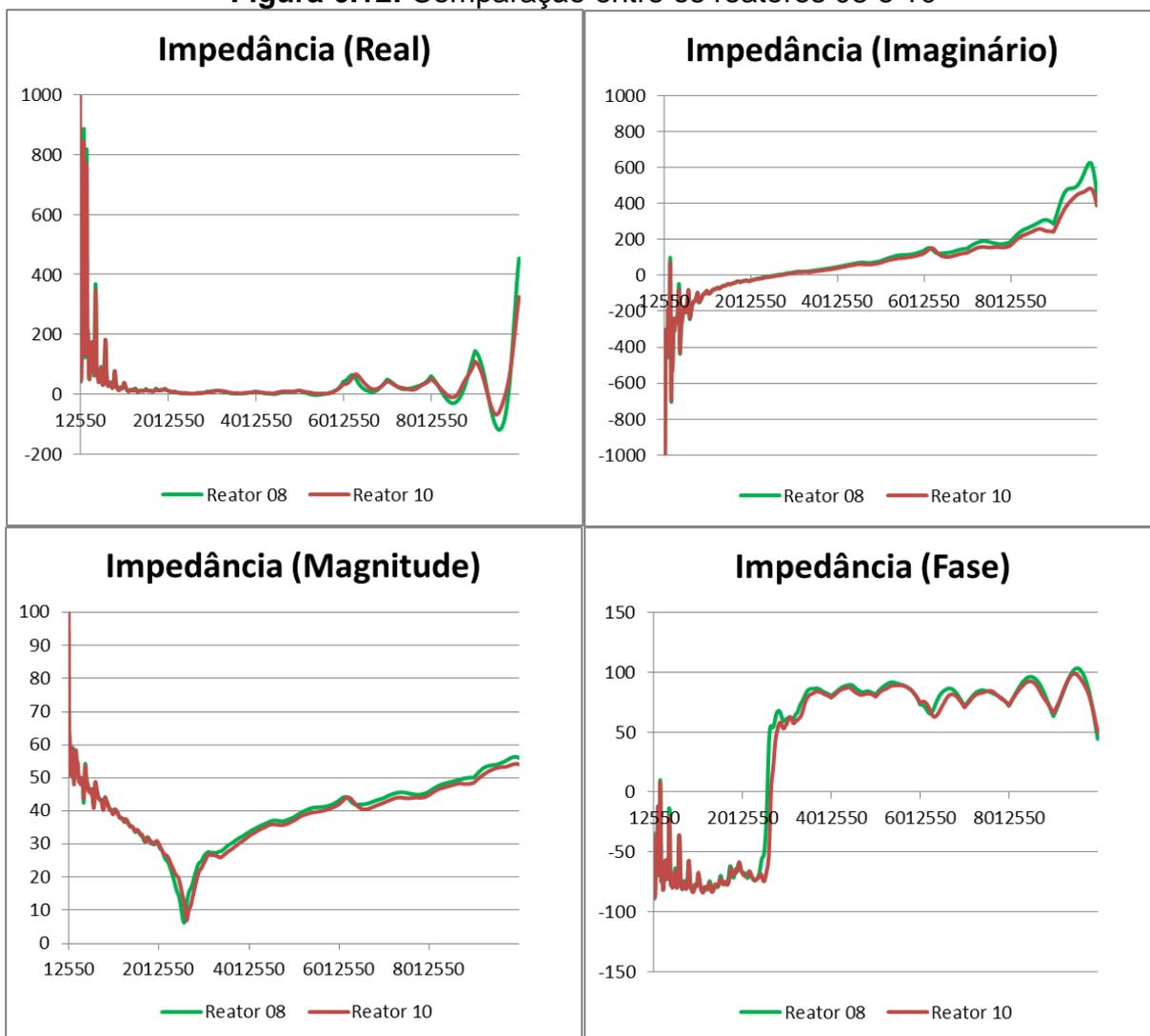


Fonte: Autoria própria

A figura 6.12 apresenta a comparação utilizada para a análise de impedância terminal do Reator 10, onde foi utilizado o Reator 08 de mesmo projeto e ano de fabricação para efeito de comparação.

Pode-se observar que as ressonâncias e amplitudes dos reatores 08 e 10 são semelhantes, indicando que não existem divergências entre os equipamentos comparados.

**Figura 6.12:** Comparação entre os reatores 08 e 10



Fonte: Autoria própria

### 6.12 Avaliação da vibração e ruído

A tabela 6.11 apresenta a avaliação de vibração e ruído do Reator 07. Observa-se que existem pontos acima da referência em dois pontos de duas faces do reator, face frontal e face lateral direita.

**Tabela 6.11: Vibração e ruído do Reator 7**

Equipamento	Face de Medição	Ponto de Medição	Valor Medido Vibração ( $\mu\text{m}$ pico-a-pico)	Nível de Referência ( $\mu\text{m}$ )	Pressão Sonora Média Global dB(A)	Nível de Referência: P.S. dB(A)	Observações
Reator 07	Face Frontal	P01 Hd	41,02	70 $\mu\text{m}$	85,70	84	Vibração: com pontos acima da referencia
		P02 Hd	13,38				
		P03 Hd	89,15				
		P04 Hd	44,71				
		P05 Hd	72,15				
	Face Lateral Direita	P06 Hd	23,55				
		P07 Hd	30,23				
		P08 Hd	19,68				
		P09 Hd	94,63				
		P10 Hd	65,44				
	Face Traseira	P11 Hd	41,32				
		P12 Hd	25,57				
		P13 Hd	15,57				
		P14 Hd	83,46				
		P15 Hd	52,39				
		P16 Hd	32,18				
		P17 Hd	11,70				
	Face Lateral Esquerda	P18 Hd	38,91				
		P19 Hd	32,80				
		P20 Hd	71,12				
		P21 Hd	61,60				
		P22 Hd	28,97				
		P23 Hd	13,50				
							Ruído: acima do valor de referencia.

Fonte: Autoria própria

A tabela 6.12 apresenta a avaliação de vibração e ruído do Reator 10. Observa-se que existem pontos muito acima da referência em três pontos de três faces do reator.

**Tabela 6.12: Vibração e ruído do Reator 10**

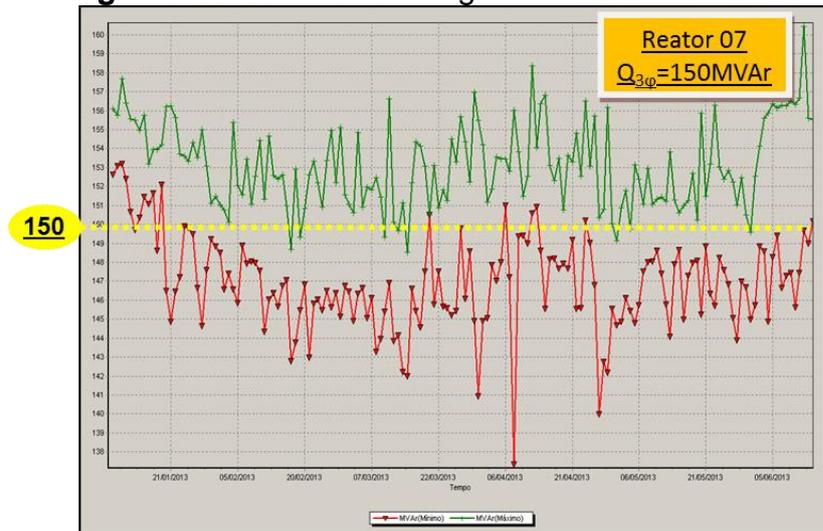
Equipamento	Face de Medição	Ponto de Medição	Valor Medido Vibração ( $\mu\text{m}$ pico-a-pico)	Nível de Referência ( $\mu\text{m}$ )	Pressão Sonora Média Global dB(A)	Nível de Referência: P.S. dB(A)	Observações
Reator 10	Face Frontal	P02 Hd	225,3	70	88,9	84	Vibração: com pontos acima da referencia
		P03 Hd	77,8				
		P05 Hd	189,5				
	P08 Hd	196					
	Face Lateral Direita	P13 Hd	207				
		P17 Hd	73,2				
	F.L.Esquerda	P24 Hd	92,3				

Fonte: Autoria própria

### 6.13 Avaliação do carregamento

A figura 6.13 apresenta a avaliação de carregamento do Reator 07 no período de janeiro a junho de 2013. Observa-se que durante todo o período analisado o reator operou acima de seu valor nominal, que neste caso é de 150 MVar.

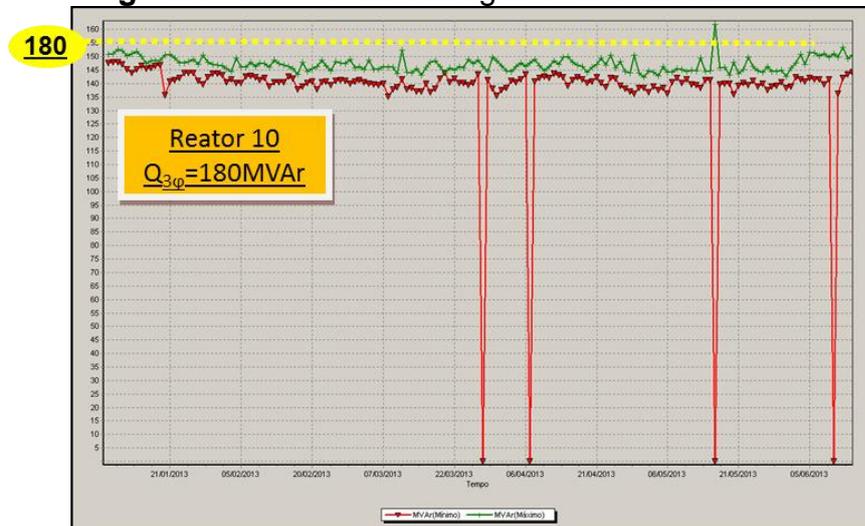
**Figura 6.13:** Nível de carregamento do Reator 07



Fonte: [102]

A figura 6.14 apresenta a avaliação de carregamento do Reator 10 no período de janeiro a junho de 2013. Observa-se que durante todo o período analisado o reator operou apenas eventualmente acima de seu valor nominal, que neste caso é de 180 MVar.

**Figura 6.14:** Nível de carregamento do Reator 10



Fonte: [102]

#### 6.14 Avaliação geral dos reatores

A avaliação dos dez reatores, descritos no início deste capítulo, realizada com cada um dos catorze agentes selecionados neste trabalho, é mostrada de forma resumida na figura 6.15 e ampliada no apêndice 1.

**Figura 6.15: Avaliação dos reatores por catorze agentes**

Equipamento	Análise de Óleo			Reator		Resistência Ôhmica (Ω)	Resistência de Isolamento			Dirana	SFRA	Impedância Terminal	Ruído e Vibração	Carregamento
	FQ	Gás	Furfural	F.P. (%)	Capac. (pF)		Resist. Isolam.	Ind. Absorção	Ind. Polarização					
Reator 01	Normal	Anormal	Normal	0,52	5663,72	3,6166	2.971,10	1,25	2,02	Úmido	Normal	Anormal	Anormal	Normal
Reator 02	Anormal	Normal	Normal	0,43	5662,20	3,5244	7.545,90	1,28	3,34	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Normal	Normal
Reator 03	Normal	Anormal	Normal	0,46	5668,65	3,5087	5.869,00	1,40	2,64	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal
Reator 04	Anormal	Normal	Normal	0,37	5266,52	3,5627	6.757,30	1,31	3,37	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal
Reator 05	Anormal	Anormal	Normal	0,27	5245,80	3,5412	8.609,10	1,15	2,45	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal
Reator 06	Normal	Anormal	Anormal	0,23	5252,55	3,5325	1.173,96	1,32	2,00	Moderadamente Úmido	Normal	Anormal	Normal	Anormal
Reator 07	Normal	Falhado	Normal	0,32	5.227,45	3,6337	360,00	1,20	2,77	Moderadamente Úmido	Anormal	Falhado	Falhado	Anormal
Reator 08	Normal	Normal	Normal	0,47	6434,51	2,6728	1.591,00	1,67	3,20	Seco	Normal	Normal	Falhado	Anormal
Reator 09	Anormal	Anormal	Normal	0,61	6622,51	2,6588	2.996,60	1,37	2,87	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal
Reator 10	Normal	Anormal	Normal	0,47	6512,66	2,6370	9.320,00	1,01	0,98	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal

Fonte: Autoria própria

Observa-se na figura 6.15, que cada agente fornece seu diagnóstico próprio, e determina um estágio e um estado baseado em recomendações dadas pelas normas, no histórico de cada equipamento e no conhecimento dos especialistas.

Assim, conforme ressaltado anteriormente, a determinação do índice da condição dos equipamentos avaliados depende de uma votação para o consenso de Estágio/Estado.

As figuras 6.16 e 6.18, ampliadas nos apêndices 2 e 3 respectivamente, mostram os ICs determinados para os dois equipamentos selecionados, Reator 07 e Reator 10, com o detalhamento de todo o processo de classificação de Estágio e Estado e de votação por seus consensos de Estágio e Estado.

**Figura 6.16: Índice da condição para o Reator 07**

Reator 07	MEEG														Consenso de Estágio (CEG)	MEED			Consenso de Estado (CED)	Índice da Condição (IC)									
	Vetores de Estágio - VE										VBEg					VLEg													
	Físico-químico	Gasromatográfico	Furfuralidade	Fator de potência - Hz	Capacitância - Hz	Res. ôhmica estática	Res. isolamento DC	Índice absorção	Índice polarização	Dirana	SFRA	Impedância terminal	Vibração e Ruído	Carregamento		Novo	Normal	Anormal			Defeituoso	Falhado	Novo	Normal	Anormal	Defeituoso	Falhado		
Curto circuito entre espiras	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	0,25	0,13	0,25	0,10	0,15	0,15	0,10	0,16	?					
Curto circuito para terra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13	0,25	0,25	0,13	0,25	0,11	0,19	0,15	0,11	0,10	Normal					
Flutuação de potencial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,10	0,23	0,10	0,10	0,10	0,10	Normal					
Curto circuito das laminações do núcleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,20	0,20	0,20	0,20	Normal					
Múltiplos aterramentos do núcleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	?					
Núcleo desaterrado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,10	0,23	0,23	0,23	0,10	0,10	?					
Falha de circuito aberto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,10	?					
Falha resistência de contato	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	0,25	0,50	0,23	0,15	0,33	Falhado	-	0,33	Falhado	-	0,33			
Inclinação do condutor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1,00				0,90					Normal					
Buckling	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33	0,33	0,33	0,33	0,13	0,30	0,13	0,13	0,13	0,13	Normal					
Movimento do enrolamento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1,00				0,90					Normal					
Estrutura de fixação solta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			0,67	0,33	0,40	0,60	Falhado	-	0,60	Falhado	-	0,60	Estado 1	1		
Deformação do condutor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,25	0,25	0,10	0,23	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	Anormal					
Degradação por umidade no óleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	0,43	0,14	0,14	0,14	0,09	0,27	0,06	0,09	0,06	Normal					
Degradação por umidade no papel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,40	0,20	0,20	0,08	0,20	0,08	0,08	0,08	0,08	Normal					
Degradação por temperatura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,20	0,30	0,20	0,30	0,20	0,20	Anormal					
Degradação devido ao envelhecimento do óleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,43	0,29	0,29	0,29	0,27	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	Normal					
Degradação devido ao envelhecimento do papel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,11	0,33	0,22	0,11	0,22	0,04	0,18	0,09	0,04	0,09	Normal					

Fonte: Autoria própria

A figura 6.16, mostra os vetores de estágios atribuídos por cada um dos catorze agentes. Observa-se que a MEEG apontou quatro modos de falha para o equipamento, que precisaram ser votadas pelo CEG. Destes modos de falha, dois



### 6.15 Intervenção com base nos resultados obtidos

O estudo de caso realizado nos reatores das Subestações de Marabá e Vila do Conde apontaram dois equipamentos em condições de Falha e Defeito, respectivamente.

O método proposto neste trabalho identificou apenas um modo de falha para o reator de Vila do Conde, mas quatro modos de falha para o reator de Marabá.

Nesta situação a engenharia de manutenção definiu que o reator de Vila do Conde passaria por um processo de recuperação, enquanto que o reator de Marabá necessitaria de uma inspeção interna para identificação do seu modo de falha.

#### 6.15.1 Inspeção interna do Reator 07

O Reator 07, com 26 anos de operação e classificado com IC=1, apresentou quatro modos de falha, sendo eles: Falha de resistência de contato, Estrutura de fixação solta, Deformação do condutor e Degradação por temperatura. Nesta situação o equipamento representava uma condição de risco para o sistema.

A fim de averiguar se os modos de falha apontados pela metodologia proposta eram condizentes, a engenharia de manutenção realizou uma inspeção interna do reator em Junho/2014. Nesta inspeção foi identificado que o terminal de conexão da bucha de alta tensão, que sai do enrolamento, estava folgado e girando num ângulo de 45°, conforme mostra a figura 6.20.

**Figura 6.20:** Conexão da bucha de alta tensão com o enrolamento



Fonte: Arquivo pessoal

Removida parte da proteção de fenolite, foi possível visualizar pontos de queima de papel isolante, conforme mostra a figura 6.21.

**Figura 6.21:** Pontos de queima de papel isolante



Fonte: Arquivo pessoal

Ao retirar as camadas superiores do papel isolante do terminal de conexão da bucha com o enrolamento foi possível visualizar papel isolante carbonizado, conforme mostra a figura 6.22.

**Figura 6.22:** Papel isolante carbonizado



Fonte: Arquivo pessoal

Após remover todos os calços e papel isolante foi identificado o rompimento quase total do terminal de conexão da bucha com o enrolamento. Sem muito esforço os poucos terminais que os mantinham conectados foram rompidos, conforme mostra a figura 6.23.

**Figura 6.23:** Rompimento da conexão do terminal da bucha de alta com o enrolamento



Fonte: Arquivo pessoal

A figura 6.24 mostra em detalhe os danos na fiação proveniente do enrolamento.

**Figura 6.24:** Fiação proveniente do enrolamento rompida



Fonte: Arquivo pessoal

Foram removidas todas as camadas de papel isolante do terminal de conexão da bucha de alta tensão para visualizar os danos neste terminal, conforme mostra a figura 6.25.

**Figura 6.25:** Remoção do papel isolante do terminal de conexão da bucha



Fonte: Arquivo pessoal

A figura 6.26 mostra em detalhes os danos no terminal de conexão da bucha de alta tensão.

**Figura 6.26:** Terminal de conexão da bucha de alta tensão danificado



Fonte: Arquivo pessoal

A inspeção interna do Reator 7 confirmou que os três primeiros modos de falha apontados pela metodologia proposta (Falha de resistência de contato, Estrutura de fixação solta e Deformação do condutor) eram condizentes com os apontados pela ferramenta, e que o quarto modo de falha apontado (Degradação por temperatura) é uma consequência dos outros três modos de falha.

Nesta situação a metodologia evitou a ocorrência de um sinistro de maiores proporções, por exemplo, a explosão do reator, que geraria danos não só ao reator e seus acessórios, mas também poderia vir a danificar outros equipamentos e estruturas adjacentes, como barramentos, para-raios, transformador de corrente, etc., conforme mostrado na figura 6.27.

**Figura 6.27:** Vista do Reator 07 e equipamentos adjacentes



Fonte: Arquivo pessoal

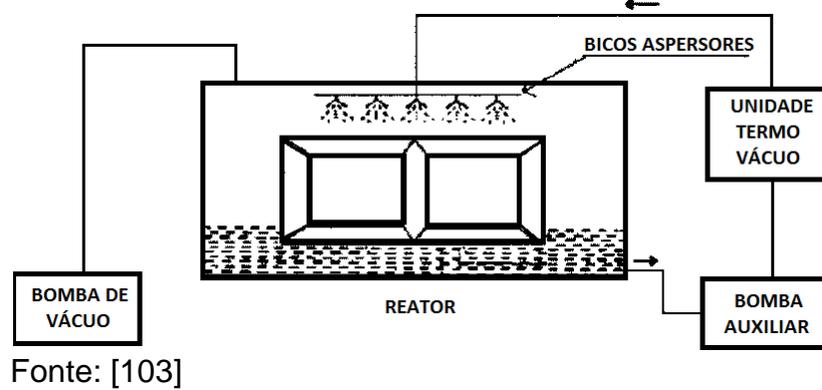
#### 6.15.2 Intervenção para restauração do Reator 10

O Reator 10, com 33 anos de operação e classificado com IC=3 por apresentar umidade em sua isolação sólida, também nesta situação representa uma condição de risco para o sistema.

Este modo de falha pode ter sido originado pelo fim de vida útil de suas vedações de elastômeros, que normalmente são de 30 anos. Isto provoca vazamentos de óleo isolante, que por sua vez servem de caminho para penetração de umidade na parte ativa do reator. Assim, a primeira recomendação é uma intervenção geral no reator para substituição de todas as vedações e em seguida um processo de tratamento do óleo mineral isolante e parte ativa pelo processo de *Hot Oil Spray*, esquematizado na figura 6.28, que retira a umidade através da circulação

de óleo mineral isolante por 24 horas a uma temperatura entre 90°C a 100°C com aplicação simultânea de vácuo de cerca de 5 mBar por 48 horas [103].

**Figura 6.28:** Diagrama do processo *Hot Oil Spray*



Além destas recomendações será necessário: realizar pintura geral do tanque e radiadores; substituir todas as válvulas tipo borboleta dos radiadores por válvulas com sede para vedações do tipo *o ring*; substituir as demais válvulas por válvulas do tipo esfera e substituir a bolsa de borracha nitrílica pelo sistema Pulmãotec [103].

Todas estas recomendações têm dois objetivos: melhorar a condição da isolamento da parte ativa do reator e bloquear a fonte de contaminação da mesma. No entanto estes procedimentos envolvem ações e contratações que demandam tempo e investimento, por isso estão programados para início em 2015. Enquanto isto o reator foi retirado do sistema e inserido um equipamento reserva em seu lugar.

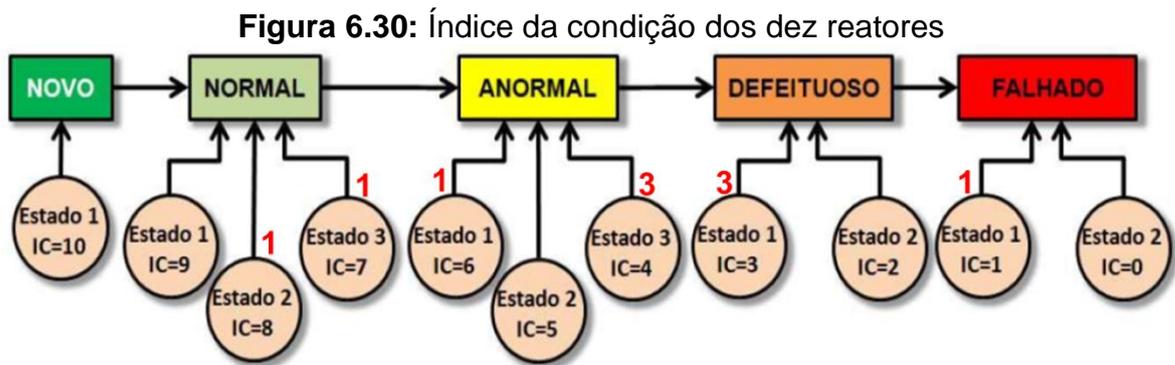
A figura 6.29, ampliada no apêndice 4, mostra de forma resumida o índice da condição calculado para os dez reatores, descritos no início do capítulo, realizada com o auxílio dos catorze múltiplos agentes selecionados para este trabalho.

**Figura 6.29:** Avaliação da condição dos reatores

Equipamento	Análise de Óleo			Reator		Resistência Ôhmica ( $\Omega$ )	Resistência de Isolamento			Dirana	SFRA	Impedância Terminal	Ruído e Vibração	Carregamento	Índice da Condição (IC)
	FQ	Gás	Furfural	F.P. (%)	Capac. (pF)		Resist. Isolam.	Ind. Absorção	Ind. Polarização						
Reator 01	Normal	Anormal	Normal	0,52	5663,72	3,6166	2.971,10	1,25	2,02	Úmido	Normal	Anormal	Anormal	Normal	3
Reator 02	Anormal	Normal	Normal	0,43	5662,20	3,5244	7.545,90	1,28	3,34	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Normal	Normal	8
Reator 03	Normal	Anormal	Normal	0,46	5668,65	3,5087	5.869,00	1,40	2,64	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal	6
Reator 04	Anormal	Normal	Normal	0,37	5266,52	3,5627	6.757,30	1,31	3,37	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal	3
Reator 05	Anormal	Anormal	Normal	0,27	5245,80	3,5412	8.609,10	1,15	2,45	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal	4
Reator 06	Normal	Anormal	Anormal	0,23	5252,55	3,5325	1.173,96	1,32	2,00	Moderadamente Úmido	Normal	Anormal	Normal	Anormal	4
Reator 07	Normal	Falhado	Normal	0,32	5.227,45	3,6337	360,00	1,20	2,77	Moderadamente Úmido	Anormal	Falhado	Falhado	Anormal	1
Reator 08	Normal	Normal	Normal	0,47	6434,51	2,6728	1.591,00	1,67	3,20	Seco	Normal	Normal	Falhado	Anormal	7
Reator 09	Anormal	Anormal	Normal	0,61	6622,51	2,6588	2.996,60	1,37	2,87	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal	4
Reator 10	Normal	Anormal	Normal	0,47	6512,66	2,6370	9.320,00	1,01	0,98	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal	3

Fonte: Autoria própria

Na figura 6.29, observa-se que apenas dois reatores foram classificados no “Estágio Normal”, o Reator 02 no “Estado 8” e o Reator 08 no “Estado 7”. Quatro reatores foram classificados no “Estágio Anormal”, o Reator 03 no “Estado 6” e os Reatores 05, 06 e 09 no “Estado 4”. Três reatores foram classificados no “Estágio Defeituoso”, os Reatores 01, 04 e 10 no “Estado 4”. E finalmente um reator foi classificado no “Estágio Falhado”, o Reator 07 no “Estado 1”, conforme mostra a figura 6.30.



Fonte: Autoria própria

Os reatores classificados como “Normal” continuam em operação normal no sistema e seus intervalos de manutenção foram ampliados de acordo com a condição de cada equipamento. Os reatores classificados como “Anormal” e “Defeituoso” passarão por processos de recuperação, de acordo com os modos de falhas identificados pela metodologia, para garantir sua condição operacional. E o reator que foi classificado como “Falhado” foi removido do sistema, antes da ocorrência de um sinistro, e desclassificado por atingir o final de vida útil técnico.

## **7 Conclusões**

### **7.1 Conclusões Gerais**

Esta dissertação, no capítulo 2, caracterizou os reatores em derivação e seus principais componentes para o entendimento de como cada um se relaciona e contribui com a expectativa de vida útil do reator como um todo.

O capítulo 3 contribuiu com a apresentação detalhada do ciclo de vida de reatores, onde foi abordado um conceito sobre expectativa de vida para reatores, classificado como final de vida técnico, estratégico e econômico. Foi abordado também neste capítulo o processo de envelhecimento do reator e os fatores agravantes para este envelhecimento, como carregamento e sobretensão.

Ficou evidente que, apesar do final de vida poder ser técnico, estratégico ou econômico, a maioria dos autores concorda que o final de vida útil está diretamente associado à deterioração do sistema isolante sólido, já que o sistema isolante líquido pode ser tratado ou mesmo substituído sem maiores dificuldades. Desta forma a definição de vida útil restante para reatores é normalmente baseada nas propriedades mecânicas residuais do papel e na sua capacidade de resistir a esforços eletrodinâmicos.

Como a retirada de amostras de papel para ensaios de avaliação de suas propriedades mecânicas não é normalmente viável, alguns estudos correlacionam o grau de polimerização (GP) com a tensão de ruptura do papel isolante. Assim a determinação do GP pode ocorrer através de uma modelização química (Arrhenius) ou através da análise de compostos furânicos dissolvidos no OMI.

A umidade é um fator agravante para aceleração do envelhecimento da isolamento sólida, por este motivo, também neste capítulo, foram apresentados dois métodos de avaliação de umidade no papel: aplicando o diagrama de equilíbrio e aplicando métodos de ensaios elétricos (RVM, PDC e FDS).

O capítulo 4 fez uma abordagem sobre os métodos de detecção de falhas com os tipos de manutenção mais difundidos no setor elétrico, além de listar os ensaios de reatores executados em fábrica (rotina, tipo e especiais) e em campo (comissionamento, rotina e especiais).

Os principais ensaios, que podem ser executados em campo para auxílio no diagnóstico dos reatores, foram detalhados neste capítulo, onde alguns destes ensaios foram utilizados como agentes para avaliação da condição de dez reatores.

No capítulo 5 foi apresentada uma metodologia com toda sistematização para avaliação da condição de reatores, baseada no diagnóstico de múltiplos agentes para gestão do ciclo de vida dos mesmos.

Nesta metodologia, com base em uma FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), uma tabela contendo os principais modos de falha do reator e seus efeitos, foram selecionados catorze agentes capazes de identificar tais modos de falha. Onde para cada agente foi levado em consideração o fator de eficácia do método na detecção de determinado modo de falha.

Além disso, foram estabelecidos critérios de interpretação para cada um dos catorze agentes, assim através de um sistema de pontuação e da execução de um conjunto de testes de diagnósticos, é possível estimar o estado de operação do reator e sua posição atual em relação ao seu ciclo de vida.

No capítulo 6 foi apresentada a aplicação da metodologia em dez reatores de duas subestações do sistema de transmissão do Pará da Eletrobras-Eletronorte que, com o auxílio dos diagnósticos obtidos e com a combinação de cada um dos diferentes agentes, permitiu:

- Estimar o ciclo de vida dos reatores.
- Detectar defeitos e falhas em estágios iniciais.
- Reduzir custos operacionais com manutenções, com adiamento de algumas manutenções periódicas amparadas no levantamento da condição de cada equipamento.
- Desclassificar um reator com base na avaliação da condição (fim de vida útil técnico).
- Retirar um reator de operação, por ter atingido fim de vida útil e assim evitar perdas com pagamento de parcela variável.
- Evitar a ocorrência de sinistro que poderia danificar equipamentos adjacentes e aumentar os custos com aquisição de novos equipamentos para substituição.

- Programar ações de secagem da parte ativa e substituição do óleo isolante para aumentar a vida útil de alguns equipamentos por meio de intervenções programadas nos mesmos.
- Aumentar o nível de confiabilidade do sistema elétrico e reduzir danos pessoais e materiais, impactos ambientais, prejuízos econômicos e a degradação da imagem da empresa.

De modo geral, considera-se que os objetivos propostos foram cumpridos, e além destes foram alcançados outros como:

- Aumento significativo do conhecimento do estado da arte dos reatores, que será disseminado através de seminários internos e externos à empresa, na qual foi realizada a aplicação da metodologia.
- Introdução de inovações nos processos de gestão da manutenção.
- Modelos de organização e gestão de informação que permitem análises técnicas sistemáticas.
- Disponibilidade de metodologia de apoio à decisão e avaliação de risco.
- Disponibilidade de dados para análises e estudos específicos;
- Publicação do artigo “Avaliação para diagnóstico dos reatores Jeumont Schneider 50 / 60 MVar da Regional de Transmissão do Pará - OTP” no PIM 2013 - Painel Interno de Melhorias da Eletrobras-Eletronorte;
- Submissão do artigo “Avaliação da condição como ferramenta de gestão do ciclo de vida de reatores” no ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré e no SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.

Os benefícios econômicos obtidos com a utilização da metodologia podem ser avaliados pelo aumento da receita através da redução da parcela variável por indisponibilidade e pela possibilidade de direcionamento ou postergação de investimentos, sempre volumosos quando referidos a reatores em derivação.

## 7.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros

No seguimento desta dissertação, foram identificadas novas linhas de investigação e trabalhos possíveis de desenvolver:

- Recolher e processar informações operacionais *online* não utilizadas neste trabalho.
- Implementar novas técnicas de diagnóstico do estado do papel com base em modelos e realização de ensaios experimentais para reforçar o conhecimento dos parâmetros e fenômenos.
- Rever a estratégia de manutenção, com introdução de novos processos de ensaio e diagnóstico, otimização de registos e avaliar os resultados.
- Utilizar técnicas de análise estatística avançadas e de *data mining* para extrair mais informação relevante das bases de dados existentes e de outros dados gerados por sistemas de monitorização *online* contínua.
- Utilizar técnicas de mineração de dados que indiquem preditivamente, em função das condições operacionais, possíveis falhas no reator.
- Amadurecer metodologias de cálculo de índices de condição com eventual revisão de pesos relativos aos fatores de eficácia que os compõem.
- Acompanhar as evoluções verificadas no estado da arte em termos de técnicas de diagnóstico, regeneração e recuperação, e novos materiais.
- Implementar indicadores de desempenho, com base nos diagnósticos, para permitir a implantação de programas de manutenção baseados na condição e/ou manutenção centrada na confiabilidade.

**APÊNDICE 1: Avaliação dos reatores por catorze agentes.**

Equipamento	Análise de Óleo			Reator		Resistência Ôhmica ( $\Omega$ )	Resistência de Isolamento			Dirana	SFRA	Impedância Terminal	Ruído e Vibração	Carregamento
	FQ	Gás	Furfural	F.P. (%)	Capac. (pF)		Resist. Isolam.	Ind. Absorção	Ind. Polarização					
Reator 01	Normal	Anormal	Normal	0,52	5663,72	3,6166	2.971,10	1,25	2,02	Úmido	Normal	Anormal	Anormal	Normal
Reator 02	Anormal	Normal	Normal	0,43	5662,20	3,5244	7.545,90	1,28	3,34	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Normal	Normal
Reator 03	Normal	Anormal	Normal	0,46	5668,65	3,5087	5.869,00	1,40	2,64	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal
Reator 04	Anormal	Normal	Normal	0,37	5266,52	3,5627	6.757,30	1,31	3,37	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal
Reator 05	Anormal	Anormal	Normal	0,27	5245,80	3,5412	8.609,10	1,15	2,45	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal
Reator 06	Normal	Anormal	Anormal	0,23	5252,55	3,5325	1.173,96	1,32	2,00	Moderadamente Úmido	Normal	Anormal	Normal	Anormal
<b>Reator 07</b>	Normal	Falhado	Normal	0,32	5.227,45	3,6337	360,00	1,20	2,77	Moderadamente Úmido	Anormal	Falhado	Falhado	Anormal
Reator 08	Normal	Normal	Normal	0,47	6.434,51	2,6728	1.591,00	1,67	3,20	Seco	Normal	Normal	Falhado	Anormal
Reator 09	Anormal	Anormal	Normal	0,61	6.622,51	2,6588	2.996,60	1,37	2,87	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal
<b>Reator 10</b>	Normal	Anormal	Normal	0,47	6.512,66	2,6370	9.320,00	1,01	0,98	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal





#### APÊNDICE 4: Avaliação da condição dos reatores.

Equipamento	Análise de Óleo			Reator		Resistência Ôhmica ( $\Omega$ )	Resistência de Isolamento			Dirana	SFRA	Impedância Terminal	Ruído e Vibração	Carregamento	Índice da Condição (IC)
	FQ	Gás	Furfural	F.P. (%)	Capac. (pF)		Resist. Isolam.	Ind. Absorção	Ind. Polarização						
Reator 01	Normal	Anormal	Normal	0,52	5663,72	3,6166	2.971,10	1,25	2,02	Úmido	Normal	Anormal	Anormal	Normal	3
Reator 02	Anormal	Normal	Normal	0,43	5662,20	3,5244	7.545,90	1,28	3,34	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Normal	Normal	8
Reator 03	Normal	Anormal	Normal	0,46	5668,65	3,5087	5.869,00	1,40	2,64	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal	6
Reator 04	Anormal	Normal	Normal	0,37	5266,52	3,5627	6.757,30	1,31	3,37	Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal	3
Reator 05	Anormal	Anormal	Normal	0,27	5245,80	3,5412	8.609,10	1,15	2,45	Moderadamente Úmido	Normal	Normal	Falhado	Anormal	4
Reator 06	Normal	Anormal	Anormal	0,23	5252,55	3,5325	1.173,96	1,32	2,00	Moderadamente Úmido	Normal	Anormal	Normal	Anormal	4
Reator 07	Normal	Falhado	Normal	0,32	5.227,45	3,6337	360,00	1,20	2,77	Moderadamente Úmido	Anormal	Falhado	Falhado	Anormal	1
Reator 08	Normal	Normal	Normal	0,47	6434,51	2,6728	1.591,00	1,67	3,20	Seco	Normal	Normal	Falhado	Anormal	7
Reator 09	Anormal	Anormal	Normal	0,61	6622,51	2,6588	2.996,60	1,37	2,87	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal	4
Reator 10	Normal	Anormal	Normal	0,47	6512,66	2,6370	9.320,00	1,01	0,98	Extremamente úmido	Normal	Normal	Falhado	Normal	3

## Bibliografia

- [1] GASTALDO, Marcelo Machado. Direito em energia elétrica: **Os agentes do mercado de energia elétrica**. Revista O Setor Elétrico, São Paulo, ed. 38, cap. 3, p. 26-29, mar. 2009.
- [2] SOUZA, V. C. **Organização e Gerência da Manutenção** - Planejamento, Programação e Controle da Manutenção. 2. ed. São Paulo: All Print, 2007.
- [3] BELTRÃO, V. C. V. M. **A logística e sua influência no desempenho do sistema de transmissão de energia elétrica**. 2012. 84 p. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade da Amazônia, Belém.
- [4] BRASIL. Lei n.º 12.783, de 11 de janeiro de 2013. Dispõe sobre as concessões de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sobre a redução dos encargos setoriais e sobre a modicidade tarifária; altera as Leis nos 10.438, de 26 de abril de 2002, 12.111, de 9 de dezembro de 2009, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 10.848, de 15 de março de 2004; revoga dispositivo da Lei no 8.631, de 4 de março de 1993; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 14 jan. 2013. Seção 1, p. 1.
- [5] CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Electrics. Study Committee 12, Working Group 09. **Lifetime evaluation of transformers**. Electra, França. n. 150, p. 39-51, Out. 1993.
- [6] DARVENIZA, M.; SAHA, T. K.; et al. **Study of Degradation of Cellulose Insulation Materials in Aged Power Transformers by Electrical and Chemical Techniques**. In: Electric Energy Conference, 1992, Brisbane Qld. (Australia), Paper... Barton, ACT: Institution of Engineers, Out. 1992. p. 299-305.
- [7] ALLAN, D.; JONES, C.; MAYNE, T. **The Application of New Technologies in Aged Transformer Condition Assessment**. In: Electric Energy Conference,

1992, Brisbane Qld. (Australia), Paper... Barton, ACT: Institution of Engineers, Out. 1992. p. 281-286.

- [8] EMSELY, A. M.; STEVENS, G. C. **Review of Chemical Indications of Degradation of Cellulosic Electrical Papers in Oil-filled Transformers.** IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology. v. 141, n. 5, p. 324-334, Set. 1994.
- [9] KACHLER, A. J. **Diagnostic and Monitoring Technology for Large Power Transformers** (Fingerprints, Trend analysis from Factory to On-Site Testing). CIGRÉ Study Committee 12, Transformers Colloquium, Sydney, Australia, Out. 1997.
- [10] KACHLER, A. J. **On site Diagnosis of Power Transformers.** In: International Symposium on Electrical Insulation, 2000, Anaheim-USA. Proceedings... Anaheim: IEEE, Abr. 2000. p. 362-367.
- [11] MOORE, H.M. **Factors Affecting the Health and Life of Transformers.** In: TechCon, 2000, Mesa, Arizona. Proceedings... Mesa: TechCom, Feb. 2000.
- [12] KELLY, D. J. **Relationship between Transformer Life and Life of Cellulose Insulation.** (Suggested FURAN Condition Limits). In: TechCon, 2000, Mesa, Arizona. Proceedings... Mesa: TechCom, Feb. 2000.
- [13] WANG, M.; et al. **Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service.** IEEE-Electrical Insulation Magazine, v. 18, n. 6, p. 12-25, Nov./Dez. 2002.
- [14] HÖHLEIN, I.; KACHLER, A. J. **Transformer Life Management - German Experience with Condition Assessment.** CIGRÉ Study Committee 12, Working Group A2, Transformers Colloquium, Merida, Mexico, Jun. 2003.

- [15] KACHLER, A. J.; et al. **Transformer Life Management**. A Handbook for Service and Diagnostic of Power Transformers. Part I, Chapter 7, Siemens internal Booklet, 2009.
- [16] CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Electrics. CIGRÉ Study Committee 15, Working Group 15.01. **Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers**. Electra, França. n. 202, p. 25-36, Jun. 2002.
- [17] HÖHLEIN, I.; KACHLER, A. J.; et al. **Transformer Life Management - A Customer's Guideline for Ageing Analytics and Laboratory Diagnostics**. Guideline for Transformers in Service, Siemens Brochure n. 61D7113 TV/Wü 100 632 PA04031.
- [18] KACHLER, A. J. **Pro and Contras of On-Site Tests on Power Transformers and Reactors**. CIGRÉ Study Committee 12, Paper n. 12-201, Set. 1968.
- [19] KACHLER, A. J.; et al. **The Universal Dielectric Response**. IEEE-Electrical Insulation Magazine, v. 6, n. 2, p. 16-22, Out. 1990.
- [20] CSEPES, G.; et al. **A DC Expert System (RVM) for checking the Refurbishment Efficiency of High Voltage Oil-Paper Insulating System using Polarization from Spectrum Analysis in Range of Long Time Constants**. In: International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 35., 1994, Paris, Paper... Paris: CIGRÉ, 1994, n.1, p. 12-206.
- [21] HOUHANESSIAN, V.D.; ZAENGL, W. S. **Time Domain Measurements of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems**. In: International Symposium on Electrical Insulation, 1996, Montreal, Proceedings... Montreal: IEEE, 1996. v. 1, p. 47-52.
- [22] GÄFVERT, U.; FRIMPONG, G.; Fuhr, J. **Modeling of Dielectric Measurements on Power Transformers**. CIGRÉ Study Committee 15, Paper n. 15-103, 1998.

- [23] HOUHANESSIAN, V. D. **Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland, 1998.
- [24] KACHLER, A. J. **Ageing and Moisture Determination in Power Transformer Insulation Systems Contradiction of RVM Methodology, Effect of Geometry and Oil Conductivity**. In: International Conference on Power Transformer, 1999, Kolobrzeg, Poland, Proceedings... Kolobrzeg: SEP, Abr. 1999.
- [25] ALFF, L.; KACHLER, A. J.; et al. **A Novel, Compact Instrument for Measurement and Evaluation of Relaxation Currents conceived for On-Site Diagnosis of Electrical Power Apparates**. In: International Symposium on Electrical Insulation, 2000, Anaheim-USA. Proceedings... Anaheim: IEEE, Abr. 2000. p. 161-167.
- [26] ZAENGL, W. S. **Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment - Transformers, Cables**. In: International Symposium on High Voltage Engineering, 12., 2001, Bangalore, India, Key Note Speech...Bangalore: DHV, Aug. 2001. Session 9, p. 76-86.
- [27] FRONTIN, S. O. (Org.). **Equipamentos de alta tensão - Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. 934 p. Brasília, 2013.
- [28] CIGRÉ Working Group A2.05. **Technical Brochure 15 - Guia de Manutenção para Transformadores de Potência**. 2013.
- [29] CRUZ, J. A. F. **Análise de técnicas e procedimentos para avaliação de transformadores de potência em atividades de comissionamento e manutenção**. 2012. 81 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém.

- [30] ABB. **Service Handbook for Transformers**. 2ª edição, Zurich, 2007.
- [31] PAHLAVANPOUR, B. **Power Transformer Insulation Ageing**. CIGRÉ Study Committee 15 Symposium, Sydney, Australia, 1995.
- [32] RASCO, J. **Naphtenic Mineral Insulating Oil Refining/Manufacture, Additives And Storage**. MyTransfo Proceedings, Turim, Itália, 2010.
- [33] MARTINS, M. A. **Sulfureto de Cobre causa falhas catastróficas em transformadores. Enquadramento do Problema e sua mitigação**. In: Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré-ERIAC, 12., 2007, Foz do Iguaçu, Artigo... Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2007.
- [34] International Electrotechnical Commission. **IEC 60422 - Mineral Insulating Oil In Electrical Equipment - Supervision And Maintenance Guidance**. Genebra, 2005.
- [35] SOARES, M. A. P. L. **Elementos para a Gestão do Ciclo de Vida de Transformadores Eléctricos de Potência**. 2011. 146 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [36] PETTERSSON, L. **Estimation of the remaining service life of power transformers and their insulation**. CIGRÉ-Electra, n. 133, p. 65-71, 1990.
- [37] WANG, M.; et al. **Review of condition assessment of power transformers in service**. IEEE-Electrical Insulation Magazine, v. 18, n. 6, p. 12-25, Nov./Dec. 2002.
- [38] IEEE Standard. **C57.91-1995: Guide for loading mineral oil-immersed transformers**. 1995.
- [39] CIGRÉ Task Force D1.01.10. **Technical Brochure 323 - Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers**. 2007.

- [40] CIGRÉ Study Committee D1. **Guideline 413 - Insulating Oil Regeneration And Dehalogenation**. Abr. 2010.
- [41] OSTERMANN, R. **Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de transformadores de potência instalados no sistema de transmissão da companhia estadual de energia elétrica**. 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [42] GRANATO, R. C.; LEVY, N. M.; TULIO, L. **Manutenção de transformadores baseado em ensaios físico-químicos e cromatográficos no sistema isolante**. 25 p. Notas de Aula - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. LACTEC, Curitiba, Ago. 2001.
- [43] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5416 - Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1997.
- [44] CARRIEL, L. P. **Carregamento e Envelhecimento de Transformadores Elétricos de Potência e Aspectos Prioritários Para a Manutenção Baseada na Condição**. 2012. 92 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [45] MOSER, H. P.; DAHINDEN, V.; BRECHNA, H. **Transformerboard II: Properties and Application of Transformerboard of Different Fibres**. Zurich: Hardcover, 1987. 222 p.
- [46] LAMPE, W., SPICAR, E. **The oxygen-free transformer reduced ageing by continuous degassing**. CIGRÉ Study Committee A2, Paper n. 12-05, 1976.
- [47] DAKIN, T.W. **Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon**. AIEE Transactions, v. 67, n. 1, p.113-122, 1947.

- [48] McNUTT, W.J. **Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides**. IEEE-Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 392-401, Jan. 1992.
- [49] BASSETTO F., A. et al. **How the Products from Insulating Oil Degradation Can Affect the Life of Transformers**. CIGRÉ Study Committee A2. Paper n. 12-104, 1992.
- [50] CLARK, F.M. **Insulating Materials for Design and Engineering Practice**. 1217 p. New York: John Wiley, 1962.
- [51] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5356-6: Transformadores de Potência: Parte 6 – Reatores**. 144 p., Rio de Janeiro, 2012.
- [52] International Electrotechnical Commission. **IEC 600354 - Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers**. Genebra, 1991.
- [53] BARBOSA, S. R. **Estudo dos efeitos da sobretensão em transformadores de potência aliada a carregamentos acima da potência nominal**. 2005. 127 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [54] IEEE Standard. **C27.12.00 - Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers**. 1993.
- [55] Lundgaard, L.; et al. **Ageing of Oil-Impregnated Paper In Power Transformers**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 1, p. 230-238, 2004.
- [56] 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.

- [57] CIGRÉ Study Committee A2. Working Group A2.30. **Technical Brochure 349 - Moisture Equilibrium And Moisture Migration Within Transformer Insulation Systems**. 2008.
- [58] KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção Função Estratégica**. 4. ed. 339 p. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2003.
- [59] LIMA, F. A.; CASTILHO, J. C. N. **Aspectos da Manutenção dos Equipamentos Científicos da Universidade de Brasília**. 2006. 52 p. Monografia (Especialização em Desenvolvimento Gerencial) - FACE/Universidade de Brasília, Distrito Federal.
- [60] BARBOSA, A. C. **Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade na Função Transmissão a fim de Reduzir o Tempo de Tempo de Indisponibilidade**. 2009. 72 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [61] ALTWEGG, J.; DUPRAZ, J.P.; MARTIN, J.; BAUDART, C. **O Telediagnóstico como Ferramenta de Otimização da Manutenção**. In: XV SNPTTE-Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1999, Foz do Iguaçu, Artigo...Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 1999.
- [62] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462: Confiabilidade e Mantenabilidade**. 37 p., Rio de Janeiro, 1994.
- [63] MARQUES, A.P. **Tópicos de Subestações**. Apostila - Escola Técnica Federal do Estado de Goiás. ETFGO, Goiânia, Nov. 1996.
- [64] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5356-1: Transformadores de Potência: Parte 1 – Generalidades**. 95 p., Rio de Janeiro, 2007.
- [65] MESSIAS, J. R. **Guia Prático de Ensaio Físico-Químicos na Manutenção de Transformadores em Óleo**. 98 p. Local: Ícone. 1993.

- [66] MORAIS, D.R. **Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante**. 2004. 112 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- [67] Centrais Elétricas do Norte - Eletronorte. **Instrução Técnica de Manutenção ITM EN-002: Óleo mineral isolante. Especificação, Inspeção, Amostragem e Controle das características**. 2008.
- [68] Centrais Elétricas de Goiás S/A - CELG. **Introdução a Cromatografia como Técnica de Manutenção Preditiva**. Divisão de Engenharia de Manutenção.
- [69] DUKARM, J. J. **Transformer Oil Diagnosis Using Fuzzy Logic and Neural Networks**. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. v. 5, p. 329-332, 1993.
- [70] Grupo Coordenador para Operação Interligada – GCOI. **Recomendação para Utilização da Análise Cromatográfica em Óleo Mineral Isolante na Recepção e na Manutenção de Equipamentos**. Subcomitê de Manutenção - 047. Ago. 1986.
- [71] MILASCH, M. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante**. 380 p., São Paulo: Edgar Blücher, 1984.
- [72] DUVAL, M. **Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 5, n. 6, p. 22-27, 1989.
- [73] International Electrotechnical Commission. **IEC 60599 - Mineral Oil-impregnated Electrical Equipment in Service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis**. International Standard. Genebra, Mar. 1999.
- [74] CASTILLO, E. V. **Aplicação de Ontologia e Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência**. 2003. 113p.,

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [75] ROGERS, R. R.; BARRACLOUGH, B.; DAVIES, L.; et al. **CEGB Experience of analysis of dissolved gases in transformer oils for the detection of incipient faults**. In: Conference on Diagnostic Testing of High Voltage Power Apparatus in Service, London. Proceedings... London: IEE, Mar. 1973.
- [76] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7274: Interpretação e Análise dos Gases de Transformadores em Serviço**. 13p., Rio de Janeiro, 1983.
- [77] IEEE Standard. **C57.104 - Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-immersed Transformers**. 30 p., 1991.
- [78] THANG, K. F.; AGGARWAL, R. K.; ESP, D. G.; et al. **Statistical and Neural Network Analysis of Dissolved Gas in Power Transformers**. IEEE Conference Publications. n. 473, p. 324-329, 2000. Artigo apresentado na 8. International Conference Dielectric Materials, Measurements and Applications, Edimburgo, Set. 2000.
- [79] DIOGO, A. C. T. **Avaliação da vida útil de transformadores de potência através da cromatografia líquida de alto desempenho**. In: XIV SNPTEE-Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, Artigo... Belém: CIGRÉ, Out. 1997.
- [80] International Electrotechnical Commission. **IEC 60270 - High-voltage test techniques – Partial discharge measurements**. 99 p., 3. Ed., 2000.
- [81] Krueger, F. H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment**. 1. ed., 193 p., London: Butterworths, 1989.
- [82] PAULINO, M. E. C. **Estado da Arte da Medição com Múltiplos Canais Sincronizados para Avaliação de Descargas Parciais**. In: IEEE Power

Engineering Society Transmission and Distribution Conference, São Paulo, Proceedings... São Paulo: IEEE, 2010.

- [83] DIOGO, A. C. T.; BASSI, W.; SILVA, H. A. P. **Diagnóstico Avançado da Condição de Umidade Interna no Isolante Sólido de Transformadores de Potência, Utilizando-se a Técnica de Correntes de Polarização e Despolarização**. In: III CITENEL-Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Florianópolis, Artigo... Florianópolis: ANEEL, 2005.
- [84] GAMBOA, L. R. A. **Ensaio Elétricos em Equipamentos de Subestações e Usinas**. 91 p., Notas de Aula - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. LACTEC, Curitiba, 2003.
- [85] KRÜGER, M.; PAULINO, M. E. C. **Diagnostic Measurements on Power Transformers**. , São Paulo, Maio, 2010. Disponível em <  
<http://www.adimarco.com.br/downloads/analise-de-resposta-em-frequencia.pdf>  
>. Acesso em: 16 abr. 2014.
- [86] RYDER, S. A. **Diagnosing transformer faults using frequency response analysis**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 19, n. 2, p. 16-22, 2003.
- [87] AFONSO, J. **Termografia - Teoria, Procedimentos e Vantagens**. Notas de Aula – Instalações Técnicas Especiais Ltda. ITEAG. Mar. 2010.
- [88] LACEN - Centro de Tecnologia da Eletronorte. **Relatório Técnico Nº RT022902008: Ensaio de emissão acústica**. 2008.
- [89] SOEIRO, N. S., et al. **Calculation of Eletromagnetic-mechanic-acoustic behavior of a squirrel-cage induction motor**. In: 2<sup>nd</sup> International Seminar on Vibrations and Acoustic Noise of Electric Machinery, Lodz, Polônia, 2000.
- [90] ATALLA, N.; BERNHARD, R. J. **Review of Numerical Solutions for Low-Frequency Structural-Acoustic Problems**. Applied Acoustics, v. 43, p. 271-294, 1994.

- [91] VIEIRA, F. **Métodos e Técnicas de Análise de Vibração**. Notas de Aula (Grupo Moura). Disponível em < <http://mundomecanico.com.br/wp-content/uploads/2011/01/M%C3%A9todos-e-tecnicas-de-analise-de-vibra%C3%A7%C3%A3o.pdf> >. Acesso em: 16 abr. 2014.
- [92] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7277:1988. Transformadores e Reatores – Determinação do Nível de Ruído**. 24 p., Rio de Janeiro, Nov. 1988.
- [93] PAULINO, M. E. C.; VELASQUEZ, J. L.; DOCARMO, H. **Avaliação da Condição como Ferramenta de Gestão do Ciclo de Vida de Transformador de Potência**. In: XXI SNTPEE-Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, Artigo... Florianópolis: CIGRÉ, 2011.
- [94] CIGRÉ Study Committee A2. Working Group A2.18. **Guide 227 - Life Management Techniques for Power Transformers**. Jun. 2003.
- [95] MORAIS, D. R.; ROLIM, J. G.; Vale, Z. A. **DITRANS – A Multi-agent System for Integrated Diagnosis of Power Transformers**. IEEE Power Tech Lausanne. p. 1917-1922, Switzerland, 2007.
- [96] Hydro Plant Risk Assessment Guide, **Appendix E5: Transformer Condition Assessment**, 2006. Disponível em < <http://www.docstoc.com/docs/7274124/Hydro-Plant-Risk-Assessment-Guide-Appendix-E6-Turbine-Condition> >. Acesso em: 16 abr. 2014.
- [97] DOMINELLI, N.; Rao, A.; Kundur, P. **Life Extension and Condition Assessment: techniques for an aging utility infrastructure**. IEEE Power and Energy Magazine. v. 4, n. 3, p. 24-35, 2006.
- [98] WOOLDRIDGE, M. **An introduction to multiagent systems**. 2. ed., 484 p. Torquay-UK: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-51946-2, Jun. 2009.

- [99] **DIRANA – Dielectric Response Analysis and Moisture in Oil-Paper Dielectrics** [software em CD-ROM]. Versão 1.6. Klaus (Austria): Omicron Electronics GmbH; 2010.
- [100] **FRAnalyzer – Sweep Frequency Response Analyser** [software em CD-ROM]. Versão 2.2. Klaus (Austria): Omicron Electronics GmbH; 2010.
- [101] **SigLacen – Sistema de Gestão do Lacen** [software na intranet]. Versão 2.0. Belém: Lacen; 2007 [atualizado em abr. 2007; acesso em 16 abr. 2014]. Disponível em: <http://abil.eln.gov.br/sgestor/acesso/modulos/processos/LACEN/sigLacen/grid.asp>
- [102] **Sistema DianE – Sistema de Análise e Diagnóstico de Equipamentos** [software na internet]. Versão 2.1. Rio de Janeiro: Cepel; 2013. [atualizado em set. 2013; acesso em 16 abr. 2014]. Disponível em: <http://diane.cepel.br>
- [103] Centrais Elétricas do Norte. **Parecer Técnico OETL 004/2014**: Relatório Técnico. Brasília: Eletronorte, 2014. 14 p.