

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

**USO DE TÉCNICAS DE MINERAÇÃO DE DADOS PARA A EXTRAÇÃO DE INDICAÇÕES
DE FALHA NA OPERAÇÃO DE HIDROGERADORES A PARTIR DE MEDIDAS DE
DESCARGAS PARCIAIS**

ANA CAROLINA NEVES PARDAUIL

DM 13 / 2016

**UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016**

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

ANA CAROLINA NEVES PARDAUIL

**USO DE TÉCNICAS DE MINERAÇÃO DE DADOS PARA A EXTRAÇÃO DE INDICAÇÕES
DE FALHA NA OPERAÇÃO DE HIDROGERADORES A PARTIR DE MEDIDAS DE
DESCARGAS PARCIAIS**

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

**UFPA / ITEC / PPGE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016**

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

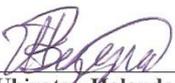
**“USO DE TÉCNICAS DE MINERAÇÃO DE DADOS PARA A EXTRAÇÃO DE
INDICAÇÕES DE FALHA NA OPERAÇÃO DE HIDROGERADORES A PARTIR DE
MEDIDAS DE DESCARGAS PARCIAIS”**

AUTOR: ANA CAROLINA NEVES PARDAUIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

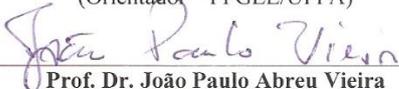
APROVADA EM: 17/06/2016

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

(Orientador – PPGEE/UFPA)



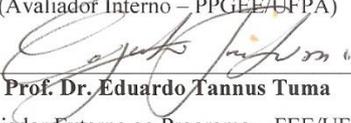
Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Eduardo Tannus Tuma

(Avaliador Externo ao Programa – FEE/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

“No amor nós descobrimos quem desejamos ser; na guerra, descobrimos quem somos”.

Kristin Hannah, *O Rouxinol*

“Dedico a minha família por toda compreensão e suporte ao longo destes anos.”

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois Ele tem sido meu guia e minha estrutura.

Agradeço a minha família por todo o incentivo, suporte e encorajamento dado ao longo de todo este caminho acadêmico, pois não foi fácil a rotina de viagens semanais.

Aos meus amigos que mesmo distantes continuaram me apoiando em todos os aspectos da minha vida.

Obrigada a todos os colegas profissionais da Eletrobras Eletronorte e do CEPEL que colaboraram com essa experiência profissional no mundo do setor elétrico, pois sempre estiveram dispostos a ensinar, ajudar, fornecer informações e compartilhar suas experiências. Com certeza sem vocês a concepção deste trabalho não seria possível.

Aos professores e colegas da UFPA que sempre se dispuseram a me ajudar e contribuíram, direta ou indiretamente, nesta formação.

E em especial tenho que agradecer ao meu orientador Ubiratan que aceitou me orientar, me dando todo o suporte necessário, sempre sendo compreensivo, mostrou apoiou em vários aspectos e abriu minha mente para um mundo de possibilidades.

PARDAUIL, A.C.N., Uso de Técnicas de Mineração de Dados para a Extração de Indicações de Falha na Operação De Hidrogeradores a partir de Medidas de Descargas Parciais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2016.

RESUMO

Mediante estudos realizados pelo CIGRE em 2009, constatou-se que a fonte principal de falhas elétricas em hidrogeradores estão correlacionados a isolação elétrica. Devido a isto, monitorar as condições do enrolamento estatórico tornou-se primordial e um dos meios de se realizar este procedimento é através da medição e análise de descargas parciais, sendo este um dos métodos mais eficazes e seguros para análise do isolamento do estator do gerador. No entanto, apesar de possuírem padrões bem definidos, não é trivial encaixar os sinais obtidos nestes padrões, devido principalmente ao grande número e variedades de ocorrências de DPs. Este aumento no volume de dados obtidos foi devido a melhorias nos equipamentos e softwares do IMA-DP que viabilizou melhor planejamento e periodicidade nas medições. O uso de uma ferramenta que agilize este processo de identificação e diagnóstico das Descargas Parciais é proposto neste trabalho, baseado em técnicas de mineração dados utilizando árvores de decisão, que é uma solução para análise de grandes volumes de dados. No caso específico aqui apresentado, utilizou-se 2435 medições provenientes da fase A de um dos hidrogeradores da Casa de Força 1 da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, o que foi fundamental para validar o método, pois trata-se de dados reais do sistema. Foi utilizada uma abordagem híbrida (não-supervisionado/ supervisionado) para identificar padrões e posteriormente classifica-los dentre as formas conhecidas de DPs. Obteve-se respostas de classificação dos sinais de forma rápida e muito satisfatória, principalmente ao se converter os dados dos mapas estatísticos em histogramas de amplitude, conseguindo assim, clusters bem definidos e uma árvore de decisão que apresentou índices de acerto global na sua validação acima de 98%.

Palavras-chaves: Descargas Parciais, Hidrogeradores, Monitoramento, Mineração de Dados, Árvore de Decisão.

PARDAUIL, A.C.N., **Using Partial Discharges Measurements and Data Mining Techniques for Extracting Failure Indications in Hydro Generators Operation.** Master's Dissertation, Postgraduate Program in Electrical Engineering at the Federal University of Pará, Belém, Pará, 2016.

ABSTRACT

By studies conducted by CIGRE in 2009, it was found that the main source of hydro generator failures is correlated to the machine electrical insulation. Due to this fact, monitoring the stator winding conditions became an important supervising procedure. A very used practice to accomplish this supervision is through the measurement and analysis of partial discharges (PDs), being this practice one of the most effective and secure methods for analysis of generator stator insulation. However, although PDs have well-defined standards, it is not trivial to classify the obtained PDs signals in these patterns, mainly due to the large number and variety of PDs occurrences. Today, the significant increase in the amount of PDs data available was due to improvements in equipment and software for PDs monitoring, as for example the system IMA-DP, which has contributed to better planned and more frequent measurement campaigns. So, this work proposes the use of an intelligent tool to facilitate the process of identification and diagnosis of partial discharges, based on data mining techniques using decision trees (DT), which is a solution for analyzing large amount of data. In the specific case presented in this dissertation it was used 2,435 measurements obtained for phase A of a hydro generator of the Tucuruí Hydro Plant, which was essential to validate the proposed method, because they represent real data obtained from the Hydro Plant operation. A hybrid approach (supervised/unsupervised) was used to identify and rank PDs patterns among the well-known forms of DPs. A fast and very satisfactory PDs classification procedure was achieved, especially when converting data from statistical maps into amplitude histograms, thus, obtaining well-defined clusters and a created decision tree that achieved global indices of accuracy above 98%.

Keywords: Partial Discharges, Hydro Generator Monitoring, Data Mining, Decision Tree.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE SIGLAS.....	xvii
CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA	18
1.2. MOTIVAÇÃO	18
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO	19
1.3.1. Objetivo Geral	19
1.3.2. Objetivos Específicos.....	19
1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
CAPÍTULO 02 – A UNIDADE GERADORA HIDRÁULICA.....	25
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
2.2. ESTRUTURA DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR	26
2.2.1. Estrutura das Bobinas	26
2.2.1.1. Barra (Meia Bobina) Ou Barras <i>Roebel</i>	27
2.2.1.2. Bobinas de Múltiplas Espiras.....	29
2.3. TIPOS DE ISOLAÇÃO.....	30
2.4. FALHAS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR.....	31
2.4.1. Falhas em Máquinas Rotativas.....	31
2.4.2. Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator	33
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
CAPÍTULO 03 - DESCARGAS PARCIAIS	36
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
3.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS.....	36
3.3. ASPECTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELÉTRICOS DAS DESCARGAS PARCIAIS	37
3.3.1. Ionização dos Átomos de Um Material Isolante	37
3.3.2. O Campo Elétrico, o Meio em que se Encontra e a Geometria dos Eletrodos	39
3.4. TIPOS DE OCORRÊNCIAS.....	42
3.4.1. Definição e Localização das Descargas Parciais	43
3.4.2. Classificação das DPs.....	46
3.4.2.1. Descargas Internas	46

3.4.2.1.1. Cavidades Internas	46
3.4.2.1.2. Delaminação Interna	46
3.4.2.1.3. Delaminação entre Condutores e a Isolação	46
3.4.2.1.4. Arborescência (<i>Treeing</i>) Elétrica	47
3.4.2.2. Descargas de Ranhura (<i>Slot Discharges</i>)	47
3.4.2.3. Descargas na Cabeça da Bobina (<i>End-Winding</i>)	47
3.4.2.3.1. Descargas de Superfície	47
3.4.2.3.2. Descargas entre Fases	48
3.4.2.4 Partículas Condutivas	48
3.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DO PROCESSO FÍSICO DA DESCARGA PARCIAL EM CAVIDADES	49
3.6. LIMITES ACEITÁVEIS PARA VALORES DE DESCARGA PARCIAL EM ESTADORES DE MOTORES E GERADORES.....	55
3.7. EFEITOS DA TEMPERATURA	57
3.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
CAPÍTULO 04 - TÉCNICAS DE DETECÇÃO	611
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	612
4.3. MÉTODOS ELÉTRICOS.....	633
4.4. FORMA DOS PULSOS NO IMPEDOR DE MEDIÇÃO	655
4.4.1. Circuito RC	655
4.4.2. Circuito RLC	666
4.5. ESPECTRO DE FREQUÊNCIA (ESCOLHA DO AMPLIFICADOR).....	677
4.5.1. Após um Circuito RC.....	677
4.5.2. Após Um Circuito RLC.....	677
4.6. MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	688
4.6.1. Características dos Circuitos de Medição.....	688
4.6.2. Variáveis do Circuito de Medição.....	699
4.6.2.1. Sinal de Referência de Tensão	699
4.6.2.2. Capacitor de Acoplamento.....	70
4.6.2.3. Fonte de Tensão Externa (Quando a Medição for Off-Line)	70
4.6.2.4. Impedância de Medição	71
4.6.2.5. Distância Física do Equipamento sob Teste	71
4.6.2.6. Frequência de Medição.....	7171
4.6.2.7. Supressão de Ruídos	72
4.6.2.8. Aterramento.....	72

4.6.2.9. Calibração.....	722
4.6.3. Sistema Aplicável a Hidrogeradores.....	733
4.6.4. Tipos de Instalação dos Acopladores.....	755
4.7. MAPAS ESTATÍSTICOS E HISTOGRAMAS DE AMPLITUDES.....	766
4.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	844
CAPÍTULO 05 - IMA-DP.....	855
5.1. INTRODUÇÃO.....	85
5.2. INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO E ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS (<i>IMA-DP</i>)	85
5.3. O SISTEMA IMA-DP.....	86
5.3.1. Circuito de Ensaio.....	86
5.3.2. Sistemas Digitais de Medição de Descargas Parciais.....	87
5.4. INSTRUMENTAÇÃO MODULAR.....	89
5.4.1. IMA-DP Monitor.....	91
5.4.2. IMA-DP Autônomo.....	98
5.4.3. IMA-DP Intensivo.....	100
5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
CAPÍTULO 06 – TÉCNICAS DE MINERAÇÃO DE DADOS APLICADAS NA CLASSIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.....	104
6.1. INTRODUÇÃO.....	104
6.2. MINERAÇÃO DE DADOS (<i>DATA MINING</i>).....	104
6.2.1. Mineração de Dados e Descoberta de Conhecimento.....	104
6.2.2. Tarefas de Mineração de Dados.....	105
6.2.2.1. Tarefas de Previsão.....	106
6.2.2.2. Tarefas Descritivas.....	107
6.2.3. Clusterização.....	107
6.2.3.1. K-Means.....	108
6.2.3.2. Algoritmo K-Means Básico.....	109
6.2.3.2.1. Atribuindo Pontos ao Centroide mais Próximo.....	110
6.2.3.2.2. Centroides e Funções Objetivas.....	111
6.2.3.2.3. Dados em Espaço Euclidiano.....	111
6.2.3.2.4. Dados de Documentos.....	112
6.2.3.2.5. Caso Geral.....	112
6.2.3.3. K-Means: Questões Adicionais.....	112
6.2.3.3.1. Grupos Vazios.....	112

6.2.3.3.2. Elementos Externos.....	113
6.2.3.3.3. Reduzindo a SSE com Pós-Processamento.....	113
6.2.3.3.4. Atualizando Centroides Incrementalmente.....	113
6.2.3.4. Dividindo K-Means	114
6.2.3.5. Pontos Fortes e Fracos	114
6.3. ÁRVORE DE DECISÃO (DECISION TREE).....	115
6.3.1. Funcionamento de uma Árvore de Decisão.....	116
6.3.2. Construção de uma Árvore de Decisão.....	117
6.3.3. Métodos para Expressar Condições de Teste de Atributos	119
6.3.4. Métricas para Selecionar a Melhor Divisão.....	119
6.3.4.1. Entropia.....	120
6.3.4.2. Gini	121
6.3.4.3. Erro da Classificação Errada	122
6.3.5. Algoritmo da Árvore de Decisão	122
6.4. ESTIMAÇÃO DO ERRO DO CLASSIFICADOR	124
6.5. VALIDAÇÃO CRUZADA (CROSS VALIDATION).....	125
6.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126
CAPÍTULO 07 – RESULTADOS	128
7.1. INTRODUÇÃO	128
7.2. RAPIDMINER.....	129
7.3. METODOLOGIA.....	130
7.4. RESULTADOS	135
7.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	140
CAPÍTULO 08 – CONCLUSÕES.....	141
8.1. CONSIDERAÇÕES	141
8.2. TRABALHOS FUTUROS.....	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - (a) Estator com Enrolamentos Fixados no Núcleo; (b) Rotor Completo; (c) Máquina Completa: Estator+Rotor	25
FIGURA 2.2 - Montagem de Barras	27
FIGURA 2.3 - Transposição Roebel 360°	28
FIGURA 2.4 - Trechos de Mapas de Tipos de Enrolamentos e Barras Características: (a) Enrolamento Imbricado; (b) Enrolamento Ondulado	29
FIGURA 2.5 - Barra de Múltiplas Espiras: (a) Corte de uma Ranhura com Bobinas de Múltiplas Espiras; (b) Bobina de Múltiplas Espiras	29
FIGURA 2.6 - Seção Transversal de uma Barra	30
FIGURA 2.7 - Falhas em Máquinas Rotativas	31
FIGURA 2.8 - Causas de Falhas em Hidrogeradores	32
FIGURA 2.9 - Falhas de Isolação Elétrica	33
FIGURA 2.10 - Exemplos de Falhas em Geradores: (a) Deterioração da Interface de Alívio de Tensão; (b) Contaminação Devido à Poeira; (c) Delaminação; (d) Más Conexões Elétricas; (e) Enrolamento Solto da Ranhura; (f) Impregnação Inadequada	34
FIGURA 3.1 - Forças no Átomo Quando se Aplica o Campo Elétrico	38
FIGURA 3.2 - Processo de Avalanche de Elétrons Iniciado a Partir de um Eletrodo Negativo (a) Início. (b) Formação de um Par de Elétrons – Impacto de um Elétron com um Átomo Neutro Libera um Elétron Adicional e Deixa um Íon Positivo para Trás. (c) Multiplicação	39
FIGURA 3.3 - Fronteira Entre Dois Meios Dielétricos Diferentes	40
FIGURA 3.4 - Eletrodo Ponta-Plano	42
FIGURA 3.5 - Secção Transversal da Barra	43
FIGURA 3.6 - Tipos de Descarga Parciais: (a) Corona, (b) Superficial, (c) Arborescência Elétrica, (d) Interna	45
FIGURA 3.7 - Fontes de Descargas Parciais no Isolamento do Estator	48
FIGURA 3.8 - Curva Lei de Paschen	49
FIGURA 3.9 - Trecho de Isolante com Cavidade: (a) Isolante com Falha de Fabricação; (b) Circuito Equivalente	50
FIGURA 3.10 - Sequência de Descargas Internas sob Tensão Alternada	50
FIGURA 3.11 - Pulso de Descarga Parcial	53
FIGURA 3.12 - Capacitor	54
FIGURA 3.13 - Descarga Parcial em Enrolamento Estatórico	58

FIGURA 4.1 - Configurações Sugeridas Pelas Normas para a Detecção e Medição de Descargas Parciais no Método Direto. Objeto de Teste com: (a) Extremidade aterrada, (b) Isolado da Terra	64
FIGURA 4.2 - Configurações Sugeridas Pelas Normas para a Detecção e Medição de Descargas Parciais no Método Balanceado. Objeto de Teste Isolado da Terra e Configurado para Haver Menos Interferência Externa	65
FIGURA 4.3 - Resposta com Circuito RC	66
FIGURA 4.4 - Resposta com Circuito RLC	66
FIGURA 4.5 - Espectro de Frequência de Pulsos Unidirecionais (Circuito RC)	67
FIGURA 4.6 - Espectro de Frequência de Pulsos Oscilatórios (Circuito RLC)	68
FIGURA 4.7 - (a) Pulso de DP; (b) Trem de Pulsos ao longo de um Ciclo Senoidal	68
FIGURA 4.8 - Acopladores Capacitivos Instalados: (a) Interior do Enrolamento; (b) Saída de Fase	70
FIGURA 4.9 - Impedância de Medição de Descargas Parciais	71
FIGURA 4.10 - Circuito de Calibração e o Calibrador Instalado nos Terminais da Máquina	73
FIGURA 4.11 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Medição	73
FIGURA 4.12 - Sistema de Rejeição em Modo Comum	74
FIGURA 4.13 - Resultado de Teste pelo PDA em um Acoplador de um Hidrogerador da UHE de Tucuruí	75
FIGURA 4.14 - Diagramas Elétricos: (a) Acopladores Diferenciais; (b) Acopladores Direcionais	76
FIGURA 4.15 - Mapa Estatístico-Caso Real	77
FIGURA 4.16 - Tipos de Descargas Parciais e Seus Mapas Estatísticos	78
FIGURA 4.17 - Padrões de Descargas Parciais	82
FIGURA 5.1 - Arranjo do Circuito de Ensaio	87
FIGURA 5.2 - Esquema de um Sistema de Medição Digital de DP	88
FIGURA 5.3 - Fluxograma geral do processamento dos sinais de DP	89
FIGURA 5.4 - Mapa Estatístico	93
FIGURA 5.5 - Topologia do Sistema de Medição	93
FIGURA 5.6 - Unidade do Hardware de Medição: Chassis PXI. a) Módulos de Chaves Comutadoras. b) Cartões Digitalizadores de Alta Velocidade. c) Canais de Digitalização. d) Módulo Controlador. e) Entrada do Sinal de Trigger Externo. f) Canal de Saída de uma Chave Comutadora, Cor Preta. g) Quatro Canais de Entrada de uma Chave Comutadora, Cor Branca	94
FIGURA 5.7 - Janela de Configuração do Hardware	95
FIGURA 5.8 - Interface para Solicitação e Acompanhamento das Medições	96
FIGURA 5.9 - Instalação Padrão do Sistema do IMA-DP	97
FIGURA 5.10 - Sistema IMA-DP - Plataforma PXI com Filtros de DP e Divisores de Tensão para o Sinal de Sincronismo	98

FIGURA 5.11 - IMA-DP Autônomo: (a) Sistema, (b) Terminais de acesso aos sinais de DP do gerador	99
FIGURA 5.12 - Interface do IMA-DP Autônomo	99
FIGURA 5.13 - Tela de avaliação das medições realizadas com o IMA-DP Autônomo	100
FIGURA 5.14 - Instalação e tela do sistema IMA-DP Intensivo, exemplificando o mapa estatístico da DP	101
FIGURA 5.15 - Análise de Tendência IMA-DP Intensivo	102
FIGURA 6.1 - O Processo de Descoberta de Conhecimento em Bancos de Dados (KKD)	105
FIGURA 6.2 - Quatro das tarefas centrais de mineração de dados	106
FIGURA 6.3 - Fluxograma Algoritmo K-Means	109
FIGURA 6.4 - Algoritmo K-Means para encontrar 3 grupos: (a) Seleciona os centroides e os grupos; (b) Recalcula os centroides; (c) Ajusta os grupos de acordo com o novo centroide; (d) Reajusta novamente os centroides e os grupos (final).....	110
FIGURA 6.5 - Uma árvore de decisão para o problema de classificação de mamíferos	116
FIGURA 6.6 - Classificando um vertebrado sem rótulo	117
FIGURA 6.7 - (a) Indução por profundidade, (b) Indução por largura	118
FIGURA 6.8 - Condição de teste para atributos: (a) Binários; (b.1) Nominais-Divisão Binária; (b.2) Nominais- Divisão Múltipla; (c) Ordinais; (d.1) Contínuos-Comparação; (d.2) Contínuos-Faixa	119
FIGURA 6.9 - Exemplo de Avaliação Cruzada	126
FIGURA 7.1 – Visão Geral do Software RapidMiner.....	129
FIGURA 7.2 - Esquemático da Metodologia Proposta para Identificação de Descargas Parciais	131
FIGURA 7.3 - A partir da matriz nx3 gera-se também o histograma de amplitude	133
FIGURA 7.4 - Histograma de Amplitude	133
FIGURA 7.5 - Processo de Mineração e Validação no <i>RapidMiner</i>	136
FIGURA 7.6 - Clusters e Correspondência com Padrões na Norma	137
FIGURA 7.7 - Árvore de Decisão para Identificação de Padrões de Descargas Parciais	138
FIGURA 7.8 - Trecho da Árvore de Decisão	138

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Características do Gerador	26
TABELA 2.2 - Tipos de Falhas nos Enrolamentos Estatóricos	33
TABELA 3.1 - Permissividade relativa (ϵ_r) e rigidez dielétrica de alguns materiais de uso corrente .	41
TABELA 3.2 - Máquinas Refrigeradas a Ar - Q_m (mV) para Barra & Anel Medidos com PDA-IV ou TGA	56
TABELA 3.3 - Máquinas Refrigeradas a Hidrogênio - Q_m (mV) para Barra & Anel Medidos com PDA-IV ou TGA	56
TABELA 6.1 - K-Means: Escolhas comuns para proximidade, centroides e funções objetivas	112
TABELA 6.2 - Matriz de Confusão	124
TABELA 7.1 – Matriz de Confusão Caso-Real	139

LISTA DE SIGLAS

BPN – Back Propagation Neural Network

CART – Classification and Regression Tree

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CIGRÉ – Conselho de Grandes Sistemas Elétricos

DP – Descarga Parcial

GA – Algoritmo Genético

IEEE – Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica

IMA-DP – Instrumento de Monitoração e Análise de Descargas Parciais

IRIS POWER – Empresa Canadense especializada em Descargas Parciais

MSP – Multi Sharp Point

PDA – Analisador de Descargas Parciais (Partial Discharge Analyser)

RF – Rádio Frequência

SOM – Mapa Auto Organizável (Self- Organizing Map)

SSP – Single Sharp Point

SVM – Support Vector Machine

UGH – Unidade Geradora Hidráulica

UHE – Usina Hidrelétrica

CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

Na atual conjuntura do setor elétrico no qual se está passando por cortes econômicos e exigências cada vez maiores para suprir as demandas energéticas, fazer o desligamento de uma máquina para realizar manutenções não é algo simples e está cada dia mais difícil realizar. Estas paradas tem que ocorrer mediante uma programação, e caso ocorram por defeitos, ou seja, acontecer uma manutenção corretiva, é indiscutível a perda de produção, tempo e multas que são geradas em consequência da retirada do gerador do sistema, o que ainda implica em perda de confiabilidade nas máquinas e na empresa.

Por conta desta realidade empresas do setor elétrico estão se preocupando ainda mais com a preservação dos seus equipamentos mais importantes (e mais custosos), que no caso do enfoque deste trabalho é o hidrogerador, e ainda enfrenta um agravante maior devido ao envelhecimento das suas partes constituintes. Investimentos em conceitos de manutenção preditiva, implica em manutenções baseadas na condição da máquina e não mais pelo tempo de utilização, e para tal é imprescindível o aperfeiçoamento das técnicas de monitoramento aplicadas à máquina.

Ocorrência de falhas elétricas em hidrogeradores, segundo (CIGRE, 2009), tem como maior causa a isolação elétrica, ou seja cerca de 56% destas, o que fortalece os princípios de que o monitoramento deve ser essencial a fim de reduzir falhas desta natureza. Uma das alternativas de menor impacto para a máquina e de alto nível de confiabilidade para monitoramento da isolação são as técnicas de medição de descargas parciais, que sendo realizadas periodicamente, pode acompanhar o nível de degradação da suportabilidade dielétrica do enrolamento estatórico do gerador e por conseguinte poder atuar antes de uma falha ocorrer caso alguma anormalidade seja encontrada.

Mediante ao que foi exposto frisa-se a importância de se aprofundar os estudos acerca do fenômeno de descargas parciais que ocorrem no enrolamento estatórico do gerador e intensificar as linhas de monitoramento deste equipamento, pois pode-se encontrar defeitos incipientes e/ou críticos e intervir antes que evoluam para um quadro mais grave, posteriormente vindo a ocorrer uma falha e, deste modo, evitar-se-ia que ocorram prejuízos ao funcionamento do sistema, financeiros e aumento da quantidade de homem-hora.

1.2. MOTIVAÇÃO

A motivação para a realização deste trabalho foi o aumento de medições de descargas parciais e a periodicidade com a qual estas vinham ocorrendo na Usina Hidrelétrica de Tucuruí, devido as melhorias nos equipamentos e softwares de monitoramento utilizados na Eletrobras Eletronorte, o que consequentemente resultou em melhor planejamento dos

testes ocasionando em um volume maior de dados para analisar e emitir os devidos diagnósticos da situação da isolação do enrolamento estatórico.

Devido ao aumento da quantidade de dados, trabalhava-se em média com duas medições por acoplador anualmente e em decorrência das três configurações de instrumentação modular utilizadas do IMA-DP (Instrumentação para Monitoramento e Análise de Descargas Parciais) passou-se a ter em alguns pontos de medição dos acopladores em torno de 300 medições realizadas, tornou-se inviável analisar todos manualmente e, portanto, propõe-se ao longo deste trabalho uma ferramenta que auxilie a identificação de padrões de descargas parciais de forma automática, pois este era o quesito de maior dificuldade nos procedimentos de análise, ou seja, estabelecer o tipo de DP que estava ocorrendo em determinado trecho do enrolamento estatórico.

Com a ferramenta proposta nesta dissertação poderá se agilizar a emissão de diagnósticos e, por conseguinte, emitir relatórios mais exatos da localização das descargas parciais e da real situação das condições de isolação do enrolamento.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1. Objetivo Geral

Estabelecer uma ferramenta automática de classificação de descargas parciais em hidrogeradores com auxílio de técnicas de mineração de dados.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal estabelecido alguns objetivos específicos foram traçados:

1. Apresentar métodos e técnicas de detecção de descargas parciais evidenciando a sua importância e metodologia aplicada;
2. Aprofundar os conhecimentos sobre o conceito de descargas parciais, evidenciando os padrões para cada ocorrência explicitados pela norma;
3. Compreender o sistema do IMA-DP e suas três vertentes aplicadas ao monitoramento de geradores;
4. Realizar estudos sobre mineração de dados e estabelecer uma técnica aplicável para atingir o objetivo principal;
5. Aplicar as técnicas de mineração de dados para extrair informações úteis do banco de dados e criar um método eficaz de classificação de descargas parciais.

1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico apresenta-se uma síntese das pesquisas principais realizadas para composição deste trabalho com relação ao fenômeno de descargas parciais em máquinas

rotativas abordando conceitos e métodos de medição, bem como concepções e estratégias para utilização de mineração de dados aplicáveis ao contexto de DPs.

Nos últimos anos houve investimentos maiores com relação a sistemas de monitoramento a cargo de criar níveis de confiabilidade maiores para o sistema elétrico brasileiro e conseqüentemente poder proporcionar uma vida útil maior ao equipamento, resultando em menores níveis de indisponibilidade das máquinas para o sistema. Na dissertação de (Santos, 2011) este aspecto é abordado e correlaciona ciclos de parada com níveis de degradação do isolamento estático. Realizar monitoramento do nível de descargas parciais como melhor alternativa de avaliação do enrolamento do estator é abordado por quase todos os autores que embasaram os capítulos subsequentes.

Pelo fato das descargas parciais terem uma importância grande na avaliação do enrolamento, muitas técnicas de medição surgiram, pois as descargas parciais podem produzir luminescência, pulsos de corrente, vibrações, ondas acústicas, etc., e com isso surgiram os métodos não-elétricos e os elétricos, sendo o último o enfoque deste trabalho, e o mais difundido para realizar medição e detecção das descargas parciais. Trabalhos apresentados por (Cuenca, 2005), (Faier, 2006), (Nascimento *et al*, 1993) e (Campos, 1983) embasados pelas normas IEC 60270 e IEEE 1434 mostram os métodos utilizados, a maneira como os acopladores capacitivos devem ser instalados, as configurações mais adequadas para os circuitos serem montados para a medição de descargas parciais e forma de interpretação e filtragem dos sinais obtidos.

Trabalhos apresentados em (Brasil, 2013) e (Santos, 2010) tratam particularidades do gerador e as partes constituintes do estator e evidenciam as pesquisas realizadas por (Cigré, 2009) que estabelecem correlações das falhas ocorridas em máquinas rotativas e como elas poderiam ter sido evitadas ou amenizadas se tivesse acontecido a detecção do problema através de linhas de monitoramento, como a medição de descargas parciais, a qual pode detectar falhas envolvendo deterioração térmica ou mesmo enrolamentos soltos.

Diante deste cenário foi necessário aprofundar os conhecimentos a respeito de descargas parciais, sendo realizado com embasamento nas normas IEC 60270, IEEE 1434 e NBR 6940, as quais são essenciais para entender os conceitos e padrões do fenômeno. Um dos autores mais respeitados e referência para compreender as DPs é o Dr. Greg C. Stone que foi um dos precursores do sistema PDA (Partial Discharge Analyser) e em (Stone, 1986) ele apresenta o funcionamento do PDA-H, vantagens e desvantagens, métodos de instalação e os requerimentos necessários para sucesso de testes, o qual foi crucial para que novos métodos e sistemas pudessem vir a surgir ao longo do tempo, como o IMA-DP. Através da sua obra estabelece valores limites de magnitude para avaliação de gravidade do enrolamento, estes dados também foram abordados por (Warren *et al*, 1999), no entanto estes valores não são aplicáveis as máquinas da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, pois os

dados de medição de descargas parciais obtidos são muito superiores aos estabelecidos para pleno funcionamento pela *IRIS POWER*, uma empresa canadense do grupo *Qualitrol*, apesar da grandeza apresentar estes valores não há inviabilização do enrolamento estatístico, pois este tem alta robustez e devido aos históricos das máquinas da UHE de Tucuruí o corpo técnico estabeleceu limites maiores de segurança e quando apresentam alguma anomalia e/ou ultrapassados irá ocorrer uma intervenção na unidade geradora.

Como citado, as obras de Greg Stone foram o embasamento para desenvolvimento de outros sistemas de medição de descargas parciais, sendo no caso o IMA-DP um deles. O IMA-DP surgiu da necessidade de se ter um sistema nacional que proporcionasse a mesma eficácia dos sistemas estrangeiros, mas com a vantagem de se ter um melhor acesso, manutenção e treinamentos de atualização no mesmo. As fases de desenvolvimento do IMA-DP foram apresentadas em diversos artigos como (Carvalho *et al.*, 2004), (Amorim *et al.*, 2007), (Amorim *et al.*, 2009), (Amorim *et al.*, 2014) e (Carvalho *et al.*, 2015). Estas publicações descrevem o sistema criado pelo CEPEL em parceria com a Eletrobras Eletronorte, e se apresenta em três vertentes: IMA-DP Autônomo, IMA-DP Intensivo e IMA-DP Monitor. Cada um projetado para níveis de periodicidade de medições requeridas para cada tipo de gerador, e evidencia-se que todos já foram implantados na Usina Hidrelétrica de Tucuruí com resultados satisfatórios.

Com o volume de dados obtidos pelas medições de descargas parciais aumentando exponencialmente houve a necessidade de se buscar alternativas para que a análise destes dados e extração de informações úteis fossem mais ágeis e corretas, pois tornou-se inviável a análise manual de toda esta informação, surgindo, portanto, a mineração de dados como alternativa para organizar e classificar padrões de descargas parciais. Publicações realizadas por (Tan *et al.*, 2009), (Cortes *et al.*, 2002), (Silva, 2004) e (Oliveira, 2013) foram alguns dos autores primordiais para compreensão dos conceitos de Mineração de Dados.

Muitos trabalhos abordam métodos de identificação de padrões de descargas parciais, mas poucos realizaram isso através da mineração de dados e estes trabalhos mais recentes, que datam de 2007-2015, que associaram o uso de mineração de dados para otimizar os resultados das medições de descargas parciais foram:

- (Babnik, *et al.*, 2007) mostra que é difícil padronizar detecção e classificação de sinais de descargas parciais em máquinas com isolamento complexo (transformadores ou geradores) devido a variação ilimitada de tipos de fontes de DP e sua localização. Neste trabalho utilizou medições remotas radiométricas de um transformador de potência com objetivo de criar grupos com características similares para avaliação. A técnica utilizada foi o mapa auto organizável (SOM) para análise e interpretação dos dados.

- (Lai *et al.*, 2008) utiliza mineração de dados descritiva de descargas parciais utilizando árvore de decisão e algoritmo genético. Criou-se experimentos com três tipos de DP: corona, descargas superficiais e descargas internas. Analisou-se os dados em fase e altura dos pulsos. Mineração de dados descritiva foi aplicada sobre os dados recolhidos usando árvore de decisão com algoritmo genético (GA) para extrair as regras / relações que podem ser usados para diferenciar a DP. Estas regras extraídas são úteis como entrada para mineração de dados de previsão tal como lógica fuzzy.
- (Lai *et al.*, 2009) investigam a relação da quantidade de vazios dentro da isolação usando como teste blocos de resina epóxi e avalia a relação do nível de DPs com a quantidade e de espaços vazios, a análise foi realizada utilizando árvores de decisão e algoritmo genético.
- (Lai *et al.*, 2010) fornece uma aplicação da mineração de dados em descargas parciais com base em modelagem de classificação preditiva. Com aumento de dados de medições de descargas parciais, principalmente por conta de medições on-line, extrair informações úteis de dados brutos é inviável manualmente então a mineração vem como uma solução para este problema. Comparou-se 3 métodos para validar a técnica BPN (Back Propagation Neural Network), SOM(Self Organizing Map) e SVM (Support Vector Machine). SVM apresentou melhores resultados quanto a precisão de classificação e velocidade de processamento.
- (Darabad *et al.*, 2010) utiliza técnicas de mineração de dados como ASM (Angular Second Moment), GLRLM (Gray Level Run Lengths) e IDF (Inverse Difference Moment) para encontrar especificações e características de descargas parciais em transformadores para monitorar a condição do isolamento do transformador online e continuamente. Ocasionalmente em melhores medidas preventivas e menor custo em manutenções.
- (Zhong *et al.*, 2010) demonstra no artigo a caracterização de um sinal puro de descarga parcial, para determinar padrões de descarga parcial e foi realizada a extração de características utilizando a técnica de clusterização K-Means para categorizar as semelhanças.
- (Peng *et al.*, 2011) propõem em seu trabalho reconhecer padrões automaticamente de descargas parciais em cabos de média tensão, tratando os dados brutos e transformando-os em informação com auxílio de técnicas de mineração de dados;
- (Poulton *et al.*, 2011) utiliza métodos de mineração de dados para prever falhas devido a descargas parciais motivados pela dificuldade em atribuir níveis precisos de tempo até a falha ou confiança para qualquer medição dada. Utilizaram conjunto

de regras *Dynamic Time Warping (DTW)* e árvore de decisão para validar o processo.

- (Liao *et al.*, 2012) fornece uma estrutura de mineração de dados para reconhecimento de padrões de descargas parciais em cabos, classificando DPs a partir de suas formas. Ocorre extração das características, seleção dos recursos, análise de agrupamento não supervisionado e validação dos resultados do clustering. Os resultados experimentais forneceram evidências que o uso de vários índices dá maior confiança na escolha do algoritmo de agrupamento sem supervisão adequada e determinar o número correto de clusters.
- (Wang *et al.*, 2014) demonstra medições de sinais em UHF para cada fonte de descargas parciais. Utilizando uma nova técnica para a classificação no tempo-frequência, usaram a técnica AOK (*Adaptive Optimal Kernel*) para adquirir as informações e caracterizados por matrizes de amplitude AOK (AOKA). Vários métodos de análise foram utilizados para validar o método como NMF-PCA (Non-Negative Matrix Factorization of Principal Component Analysis) e todas as características são extraídas como vetores de entrada por *fuzzy k-nearest neighbor* (FkNN) para obter o reconhecimento do sinal de DP. Os resultados obtidos neste trabalho fornecem uma base técnica de mineração de dados que pode ser utilizado para reconhecimento de padrões de DPs com base em detecção de UHF.
- (Wang *et al.*, 2015) apresenta um algoritmo híbrido baseado em transformada S e afinidade do agrupamento de propagação (APC) para separação de dois sinais artificiais simultâneos de descarga parcial da isolação óleo-papel de transformadores. Os resultados mostram-se efetivos na eliminação de ruídos em forma de impulsos (PSN) e impulsos separados de duas fontes DP simultâneas e o trabalho pode ser uma base para técnica de mineração de dados que ajudaria a facilitar a emissão de diagnósticos de descargas parciais em transformadores.

Estes trabalhos citados não abordam o tratamento de dados de descargas parciais em hidrogeradores, maioria trata de cabos e transformadores. No entanto, as técnicas utilizadas por estes autores foram primordiais para moldar o trabalho realizado ao longo desta dissertação do melhor modo possível e como resultado teve-se valores excelentes de acerto global.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos, a seguir apresentados.

No **primeiro capítulo** conforme demonstrado ao longo do mesmo, apresenta-se uma prévia do tema de descargas parciais e mineração de dados, bem como justificativas e

motivações que possibilitaram o aprofundamento destes conhecimentos com intuito de se atingir os objetivos almejados.

No **segundo capítulo** aborda-se sobre a importância e técnicas de detecção de descargas parciais em hidrogeradores através de métodos elétricos e não-elétricos e apresentando as particularidades de cada montagem de circuito.

No **terceiro capítulo** apresenta-se uma generalização da estrutura do gerador, com ênfase na composição do enrolamento do estator e sua isolação elétrica. Mostra-se ainda as maiores causas de falhas em geradores e as relações com a isolação elétrica.

No **quarto capítulo** é proporcionado uma abordagem dos principais conceitos de descargas parciais, aspectos físicos, químicos e elétricos do fenômeno, bem como os padrões estabelecidos pelas normas.

No **quinto capítulo** expõe-se a respeito do sistema IMA-DP, suas particularidades e as 3 formas as quais este pode ser apresentado de acordo com cada necessidade, sendo estas o IMA-DP Autônomo, IMA-DP Intensivo e IMA-DP Monitor.

No **sexto capítulo** exhibe-se conceitos a respeito da mineração de dados, que é uma etapa do KDD, método de K-Means e Clusterização, e também trata-se da árvore de decisão e validação cruzada como formas de decisão e apuração dos resultados obtidos.

No **sétimo capítulo** são abordadas as técnicas, metodologia e resultados obtidos para conseguir atingir o objetivo proposto que foi de classificar padrões de descargas parciais de modo ágil e com alto nível de exatidão.

No **oitavo capítulo** é por fim apresentado as conclusões finais a respeito de todo o trabalho e sugestões para trabalhos futuros no segmento de análise de dados de medições de descargas parciais.

CAPÍTULO 02 – A UNIDADE GERADORA HIDRÁULICA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O gerador elétrico possui basicamente duas partes fundamentais: o rotor e o estator, sendo este último o foco de abordagem ao longo deste trabalho.

A função do rotor em uma máquina rotativa implica em criar um campo magnético girante o qual gerará pelo movimento, tensão no enrolamento do estator, o qual é constituído por um conjunto de bobinas (condutores) fixadas por um núcleo aterrado. Na Figura 2.1 é possível observar parte desta estrutura constituinte.

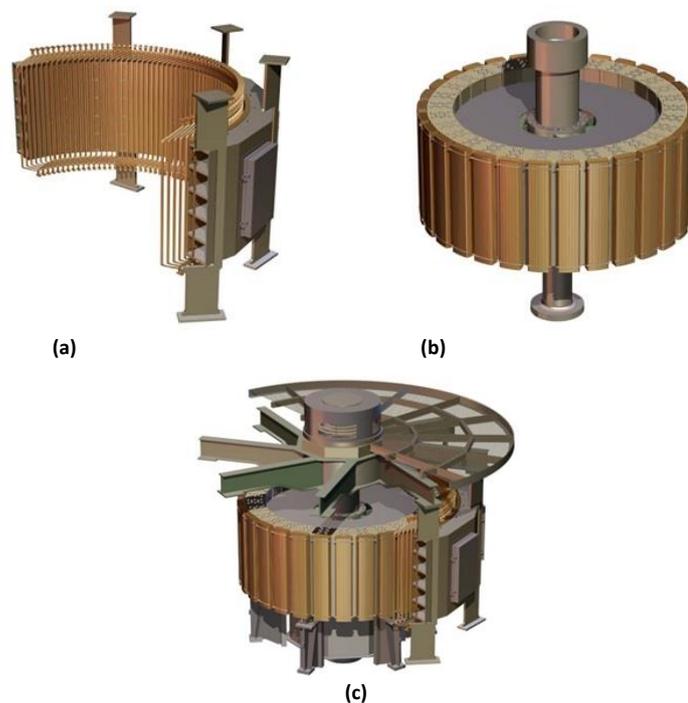


Figura 2.1 - (a) Estator com Enrolamentos Fixados no Núcleo; (b) Rotor Completo; (c) Máquina Completa: Estator+Rotor
Fonte: Uemori, 2012, pg. 19

O núcleo concentra o campo magnético e é uma das partes constituintes com a qual se deve ter um cuidado maior, pois se houver má instalação deste componente do estator dificilmente se poderá desmontar e consertar o problema; desníveis no núcleo acabam interferindo na fixação dos enrolamentos e na dissipação do calor.

O estator concentra toda a energia elétrica gerada, e tanto a corrente quanto a tensão são bem elevadas quando se tem por base o que circula no campo (rotor), já que este apenas produz um campo magnético no intuito de excitar a máquina, ocasionando, deste modo, a indução de tensão nos terminais dos enrolamentos do estator. (Brasil,2013)

Para se compreender melhor a máquina em questão, que será o objeto de estudo neste e nos capítulos subsequentes, apresenta-se na Tabela 2.1 as características básicas da mesma.

Tabela 2.1- Características do Gerador

Fabricante	Jeumont Schneider
Potência (MVA)	350
Tensão (kV)	13,8
Corrente (kA)	14,643
Frequência (Hz)	60
Fator de Potência	0,95
Número de Circuitos/Fase	8
Número de Pólos	88
Rotação (rpm)	81,8
Tipo de Excitação	Estática
Tipo de Ligação	Estrela
Classe de Isolação	F
Tipo de Enrolamento	Imbricado

Fonte: Eletrobras, 2013

De posse de tais informações e ainda sabendo que há uma grande diferença de potencial entre o enrolamento e núcleo aterrado do estator, por questões de proteção é importante separar essas duas partes da estrutura através de material isolante.

A isolação é essencial ser muito bem feita, pois irá proporcionar uma segurança maior ao equipamento já que impede, limita e/ou direciona o fluxo das correntes elétricas, oferece um suporte mecânico e protege o condutor de degradações ocasionadas pelo cotidiano de operação, e auxilia na transferência de calor.

Apesar de ter seus pontos fortes, a isolação é uma parte bastante vulnerável do enrolamento, pois é a que sofre com mais intensidade o envelhecimento, e níveis de estresses, estes de diversas naturezas, sejam químicos, físicos, ambientais, elétricos, etc. os quais são inevitáveis quando se trata das diversas condições de operação que a máquina enfrenta diariamente. (Brasil, 2013)

2.2. ESTRUTURA DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR

2.2.1. Estrutura das Bobinas

Neste tópico tratar-se-á basicamente de dois tipos de barras que são abordadas na utilização nos enrolamentos do estator ao se tratar principalmente de máquinas com potência igual ou superior a 75 MW, e a escolha por algum tipo específico é embasada nos requisitos da potência de saída e pelo fator de potência requisitado para a máquina em questão (Brasil, 2013). Esses tipos são:

- Uma barra (meia bobina);
- Bobina de múltiplas espiras.

2.2.1.1. Barra (Meia Bobina) Ou Barras *Roebel*

Esse tipo de barra com transposição é fabricada de forma que ao longo de uma única espira há a distribuição uniforme da corrente em todos os condutores que as compõe. Isto ocorre pois há uma transposição dos condutores como uma forma de equilibrar os campos magnéticos que estão circulando pelos condutores no núcleo estatórico.

Essa transposição tem por objetivo melhorar a eficiência das bobinas e decair a temperatura durante a operação da máquina girante. Essas barras geralmente são utilizadas em geradores de grande porte, pois são altamente eficientes e de fácil fabricação e montagem no núcleo magnético, isto quando se compara às bobinas de múltiplas espiras. (Nishi,2007)

Em tal perfil de barra há a diferenciação entre barra de “frente” e de “fundo” o que é determinado pela forma que ocorre a inserção da barra na ranhura. Sendo este tipo de barra separada em duas seções, ocorre que ao colocá-las na ranhura são depois conectadas à sua metade e formam a bobina completa. A barra é formada por condutores de cobre isolados individualmente (*strands*), que são torcidos para montagem do efeito *Roebel*. Tal efeito se dá por conta da montagem que faz com que a rotação dos condutores, na parte interna da barra, crie uma melhor distribuição de correntes na superfície, e uma melhor dissipação de calor. No intuito de se compreender melhor a forma deste tipo de barra e como ocorre a montagem desta, apresenta-se tal esquema na Figura 2.2. Evidencia-se que estas barras podem possuir basicamente dois tipos de projeto, podendo ser de cunho imbricado ou ondulado. (Santos *et. al*, 2010)

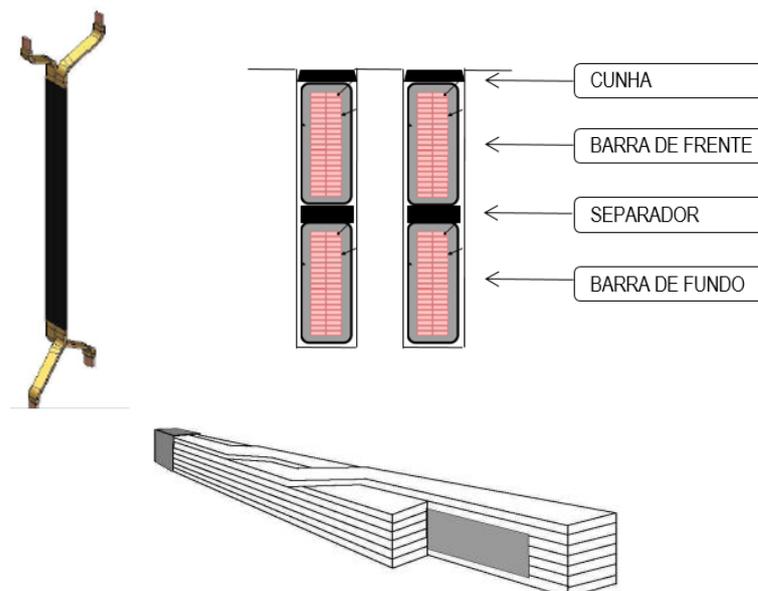


Figura 2. 2- Montagem de Barras
Fonte: Eletrobras,2013

Esse tipo de barra é formado por vários condutores de seção retangular, normalmente transpostos de 360° de acordo com o sistema Roebel, sendo cada fio isolado independentemente, mostrado na Figura 2.3. Este processo de transposição distribui a corrente igualmente por toda a seção da barra, fazendo com que as perdas por correntes parasitas e pelo *Efeito Field* sejam tornadas mínimas.

Na Figura 2.3 está ilustrado como cada condutor elementar ocupa todas as posições na barra dentro do comprimento do núcleo. Por este motivo, existe uma limitação construtiva na confecção de barras Roebel imposta pelo comprimento do núcleo estatórico, uma vez que, para completar a transposição de 360° , faz-se imprescindível um comprimento mínimo dependente do número e dimensões do fio. As barras geralmente são identificadas por sua posição relativa dentro do núcleo como barra superior ou barra inferior. Essas barras são inseridas nas ranhuras e depois conectadas à outra metade, formando a bobina completa. (Brasil *et. al*, 2015).

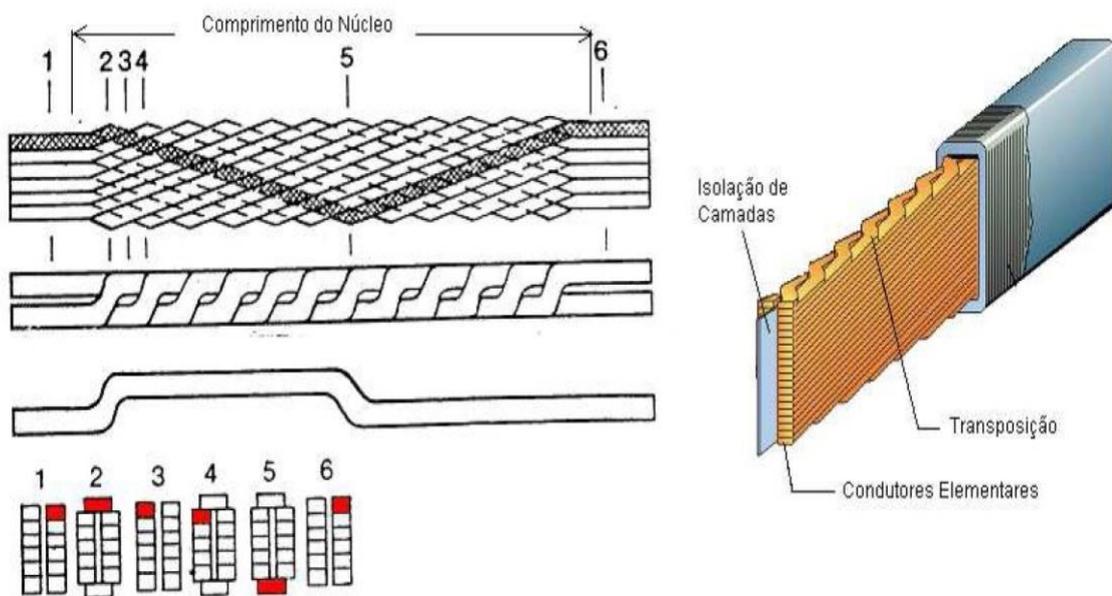


Figura 2. 3 – Transposição Roebel 360°
 Fonte: Brasil *et. al*, 2015, pg.06

Ao se tratar dos enrolamentos, sejam estes imbricados ou ondulados, exhibe-se na Figura 2.4 trechos de mapas de enrolamentos a cargo de se compreender melhor como este é instalado em uma máquina. A diferença básica entre eles é que o imbricado tem os terminais de suas bobinas ligados à barras vizinhas, enquanto no ondulado os terminais das bobinas estão separados em dois passos polares. (Brasil,2013)

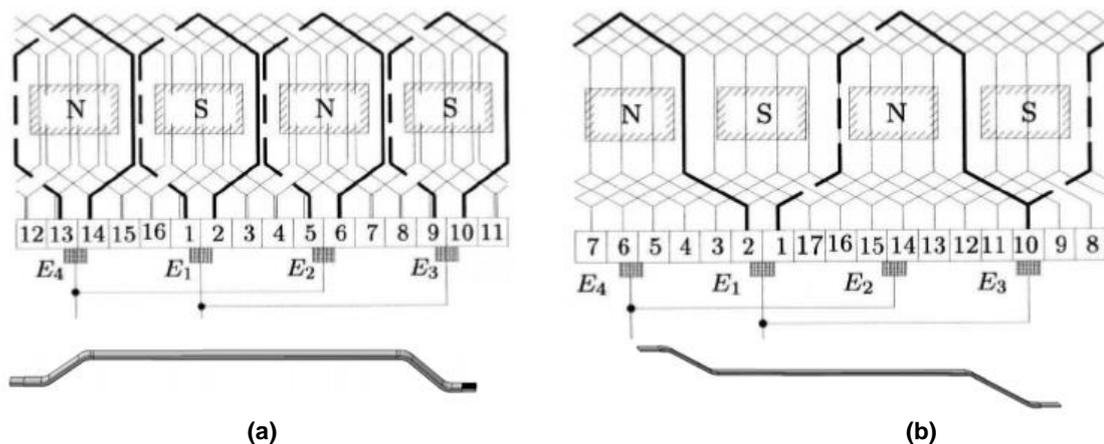


Figura 2. 4 - Trechos de Mapas de Tipos de Enrolamentos e Barras Características:
 (a) Enrolamento Imbricado; (b) Enrolamento Ondulado
 Fonte: Brasil,2013, pg.09; Brasil et. al, 2015, pg.05

2.2.1.2. Bobinas de Múltiplas Espiras

As bobinas de múltiplas espiras são formadas por conjuntos de condutores elementares, sendo que cada bobina pode apresentar mais de uma espira.

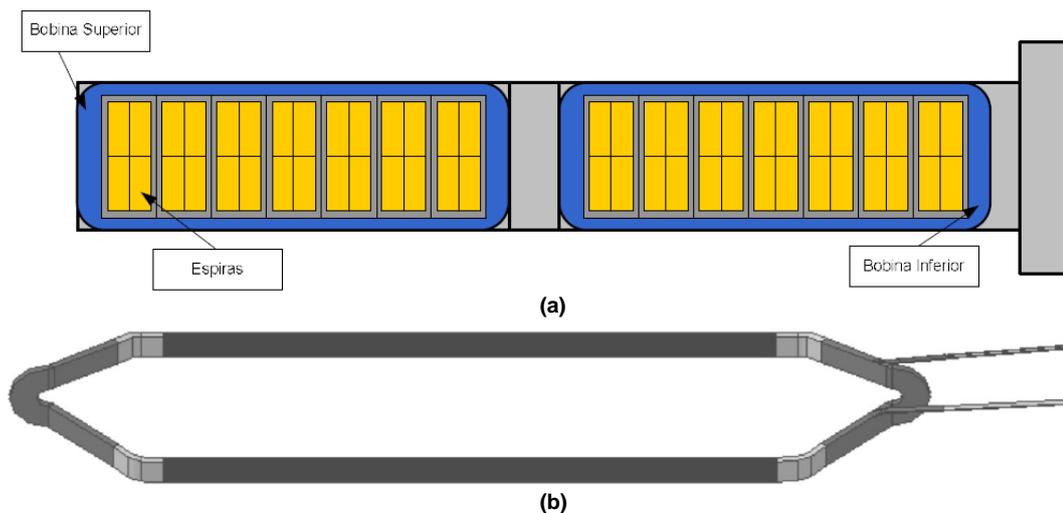


Figura 2. 5 - Barra de Múltiplas Espiras: (a) Corte de uma Ranhura com Bobinas de Múltiplas Espiras; (b) Bobina de Múltiplas Espiras.
 Fonte: Brasil,2013, pg.10

A Figura 2.5(a) representa o corte transversal da ranhura do enrolamento de dupla camada formada por bobinas de múltiplas espiras e a Figura 2.5(b) mostra uma bobina constituída por seis espiras, sendo que cada uma destas é formada por quatro condutores. Verifica-se que existindo flexibilidade no projeto destes enrolamentos, é possível variar o número de circuitos paralelos e de ranhuras para obtenção de melhores soluções; tudo isto, graças a possibilidade de alocar maior quantidade de espiras por bobina. Evidencia-se que pelo fato de a bobina ter um perfil “inteiro” sua montagem é mais difícil, e no caso da unidade geradora, que será foco do estudo nos capítulos subsequentes, o enrolamento é

formado por bobinas tipo *roebel*, portanto não se priorizará entrar em detalhes nos enrolamentos formados por múltiplas espiras. (Brasil,2013)

2.3. TIPOS DE ISOLAÇÃO

Perante o foco do estudo que se refere as barras tipo *Roebel*, trata-se basicamente de três tipos de isolação em um enrolamento do estator as quais são: *strand*; *turn*; e *groundwall*. Estes representam a isolação individual do condutor de cobre, isolação de grupo de condutores que forma uma espira e a isolação externa da bobina ou barra, respectivamente. No caso de bobinas de múltiplas espiras esses três tipos de isolação se aplicam, e em barras por não possuírem espiras, não há presença da isolação *turn*.

Na Figura 2.6 é mostrado um esquema básico de como estão localizadas as isolações, ilustrando-se por uma imagem a qual simula a seção transversal de uma barra, exibindo vários condutores de cobre, todos isolados individualmente.

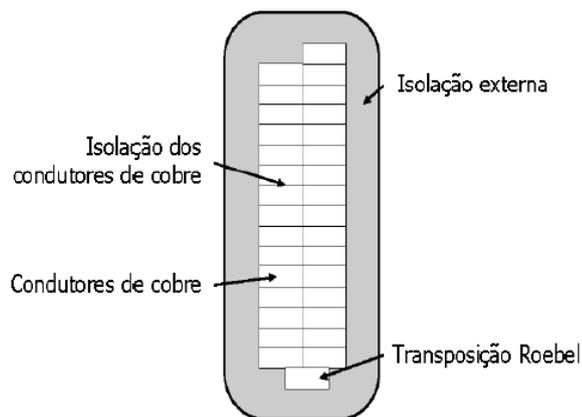


Figura 2. 6 - Seção Transversal de uma Barra
Fonte: Santos et al., 2010, pg.04

Falhas entre esses condutores individuais de cobre não costumam apresentar problemas graves, ocasionando geralmente apenas perda de fluxo magnético, no entanto caso haja alguma ruptura ou centelhamento pode ocasionar perda total da barra ou bobina. A isolação externa tem o intuito de proteger os condutores de cobre em alta tensão e o núcleo aterrado, a cargo de não ocorrer curto entre eles.

A espessura e materiais usados neste tipo de isolação varia com a necessidade da máquina e o nível de esforços a qual esta é submetida. Geralmente tais valores são fornecidos pelo fabricante. Nem sempre uma isolação mais grossa seria a solução para uma maior proteção, pois haveria menos cobre e maior estresse térmico, em contra partida quanto mais fina a isolação maior estresse de tensão e conseqüentemente riscos maiores de haver falhas no equipamento. Geralmente, usa-se mica na isolação externa e esta é impregnada com tintas de resina epóxi. Esse tipo de resina proporciona melhor estabilidade mecânica, mas não as protege completamente de altos estresses elétricos e térmicos. Estas

resinas recebem o nome de termorrígidas. Pode-se frisar que além de tudo, o tempo é um grande agravante para a isolação. Máquinas mais antigas costumam ter falhas na isolação devido ao alto tempo de uso e estresses submetidos. (Santos *et. al*, 2010)

2.4. FALHAS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR

Falhas no isolamento do estator são extremamente recorrentes, pois esta parte da estrutura do gerador é a que é submetida aos maiores níveis de degradação, seja ele de origem elétrica, mecânica ou química. De posse desta afirmação encara-se o isolamento estatórico no intuito de se compreender a gravidade do que pode ocorrer em falhas na máquina e ainda ter uma base para fundamentar ainda mais a importância do monitoramento das descargas parciais.

2.4.1. Falhas em Máquinas Rotativas

De acordo com o estudo publicado por (Santos *et. al*, 2010), o qual toma como base as diversas pesquisas e análises realizadas pelo (CIGRÈ,2009) em máquinas rotativas, evidencia que os maiores problemas elétricos em máquinas rotativas de grande porte acontecem no enrolamento estatórico, conforme os resultados apresentados na Figura 2.7.

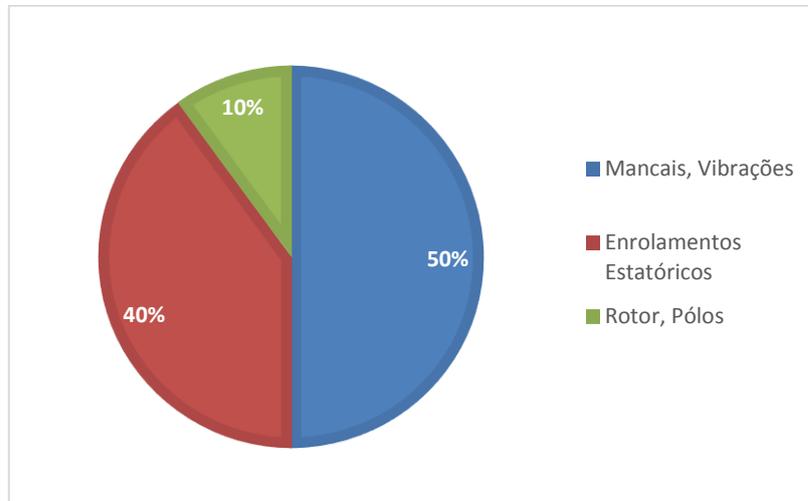


Figura 2. 7 – Falhas em Máquinas Rotativas
Adaptado: Santos *et. Al*, 2010, pg. 01

Como estresses elétricos (enrolamentos estatóricos, rotor, polos) e mecânicos (mancais, vibrações) totalizam 50% cada, e os elétricos serem o foco de estudo, não se pode desprezar as ocorrências mecânicas, pois estas proporcionam problemas de estresses químicos e térmicos, por exemplo, o que implica em envelhecimento mais rápido do isolamento do estator ao longo do tempo. (Santos *et. al*, 2010)

A investigação das falhas segue procedimentos de análise das condições da máquina. Procedimentos estes que buscam se chegar à causa raiz da falha através de análise

minuciosa de todos os sistemas de monitoramento existentes, com este procedimento pode-se verificar as condições da máquina nos instantes de tempo pré-falha e com isso buscar elementos para identificação das causas que levaram a falha.

A análise do desempenho dos sistemas de monitoramento constitui os elementos básicos da manutenção preditiva, ou seja, que consiste em se avaliar os equipamentos continuamente antes de ocorrerem falhas.

Embasado em um estudo internacional realizado pelo (CIGRE,2009), o qual foi apresentado por Brasil, 2013, teve como foco a análise de causas de falhas em hidrogeradores. Neste estudo foram avaliados 69 incidentes separando as possíveis falhas em máquinas rotativas, mais especificamente em hidrogeradores, conforme apresentado na Figura 2.8.

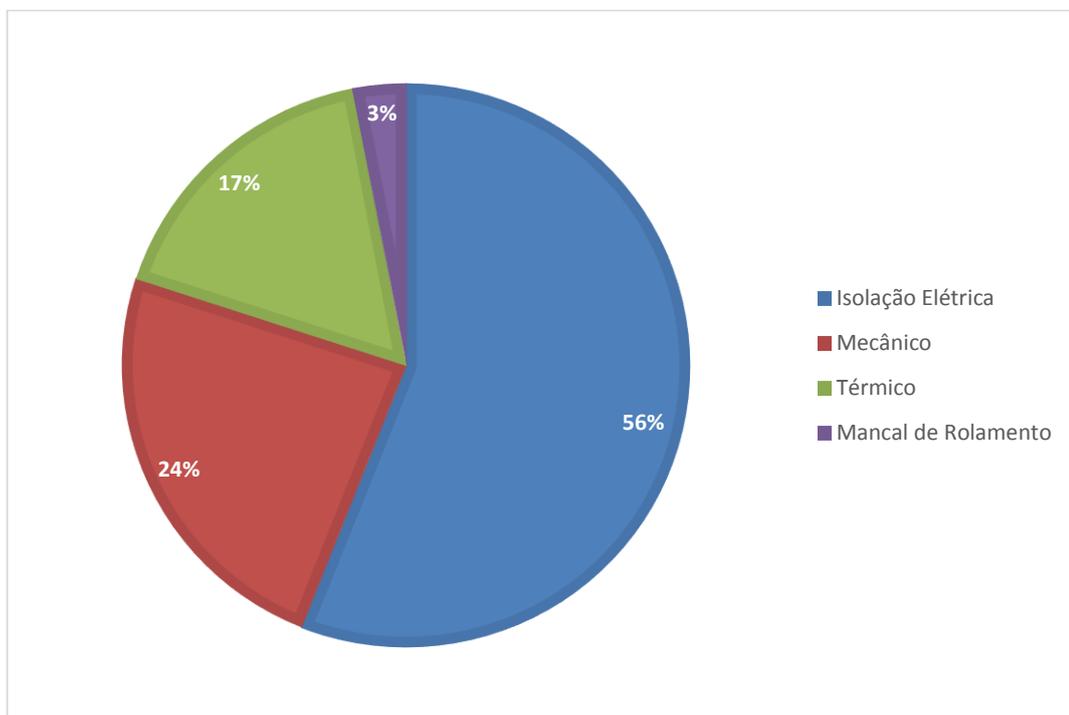


Figura 2.8 - Causas de Falhas em Hidrogeradores
Adaptado: Brasil,2013, pg. 14

Com relação as falhas na isolação elétrica esta foi minudenciada e tais resultados são apresentados na Figura 2.9, a qual mostra que a causa principal de ocorrência destas falhas se deve ao envelhecimento e contaminação do enrolamento geralmente devido a poeira e/ou umidade. Não se pode desprezar ainda falhas de caráter de afrouxamento das barras, pois estas muitas vezes ocorrem devido a vibrações indesejadas na máquina, e as demais ocorrências que acarretam falhas de perfil elétrico.

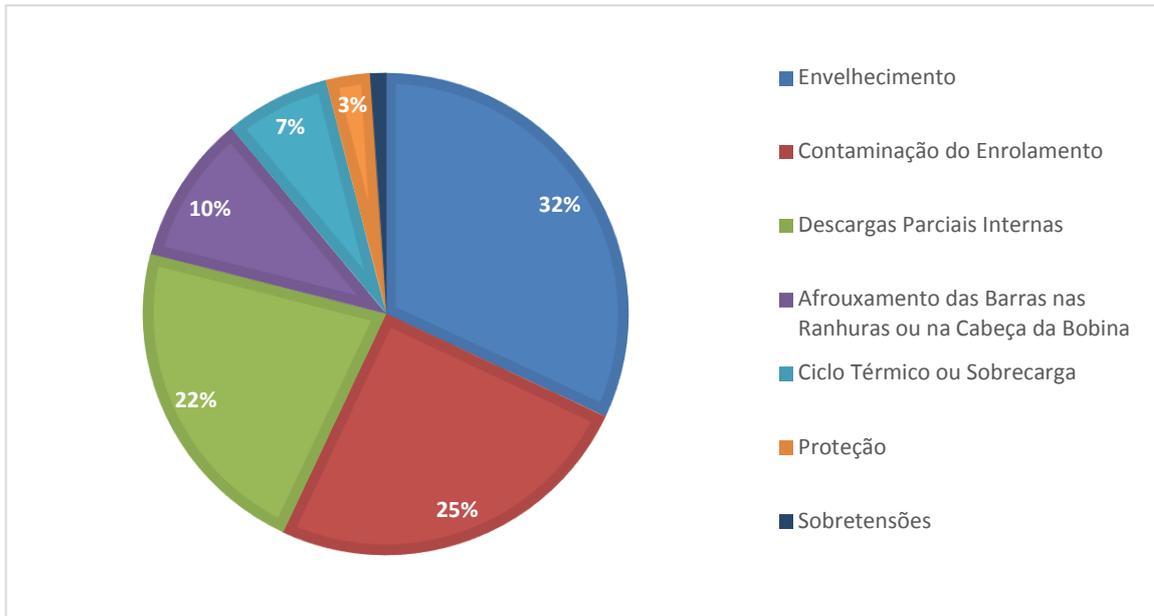


Figura 2.9 - Falhas de Isolamento Elétrica
Adaptado: Brasil, 2013, pg. 14

2.4.2. Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator

Apresenta-se na Tabela 2.1 as falhas nos enrolamentos que podem acontecer por estresse elétricos, mecânicos, térmicos, químicos, ambientais, que ocasionam a deterioração da isolamento. Tais falhas podem vir a ser detectadas através do monitoramento das descargas parciais. Observa-se que na maioria dos casos, os testes das descargas parciais é o mecanismo usado para a detecção de possíveis problemas que tendem a acarretar estas falhas. (Santos *et al.*, 2010)

Tabela 2.1- Tipos de Falhas nos Enrolamentos Estatóricos

Mecanismo de Falha	Sintomas	Teste de Detecção	Tipo de Máquina
Impregnação inadequada	PD	PDA, $\tan \delta$, fator de potência	Global VPI e fita com resina
Falhas na cobertura semicondutora	PD, descarga na ranhura, ozônio	PDA, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas à ar
Enrolamento solto	PD, cunhas soltas, ozônio	PDA, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Sistemas com isolamento termorrígida (epóxi e poliéster)
Centelhamento por vibração	PD, cunhas soltas, ozônio	PDA, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Com isolamento à base de fita com resina ou VPI
Interface de alívio de tensão	PD, pó branco (ácido nítrico), ozônio	PDA, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas a ar e com pintura na interface de alívio de tensão
Espaçamento inadequado	PD, pó branco, descoloração da isolamento e ozônio	PDA, inspeção visual, monitorar ozônio	Refrigeradas a ar, seccionadoras e conexão de motores
Vibração das cabeças das bobinas	Perda do sistema de bloqueio e amarração, pó branco disperso ou graxa,	Inspeção visual, acelerômetro de fibra ótica	Alta tensão, alta velocidade com grandes cabeças de bobinas
Conexão elétrica pobre	PD, pó branco e descoloração das conexões	PDA, inspeção visual, temperatura com infravermelho	Qualquer conexão

Deterioração térmica	PD, descoloração da isolação	PDA, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual	Todos os tipos de máquinas
Ciclos de carga	PD, ruptura da isolação na saída da barra	PDA, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual, Surge Test, Hipot	Todos os tipos de máquinas (com barras longas)

Fonte: Santos et. al, 2010, pg. 06-07

Algumas das falhas apresentadas na Figura 2.9 são melhor caracterizadas pelas fotos apresentadas na Figura 2.10. Todas as fotos estão de acordo com a Tabela 2.2.

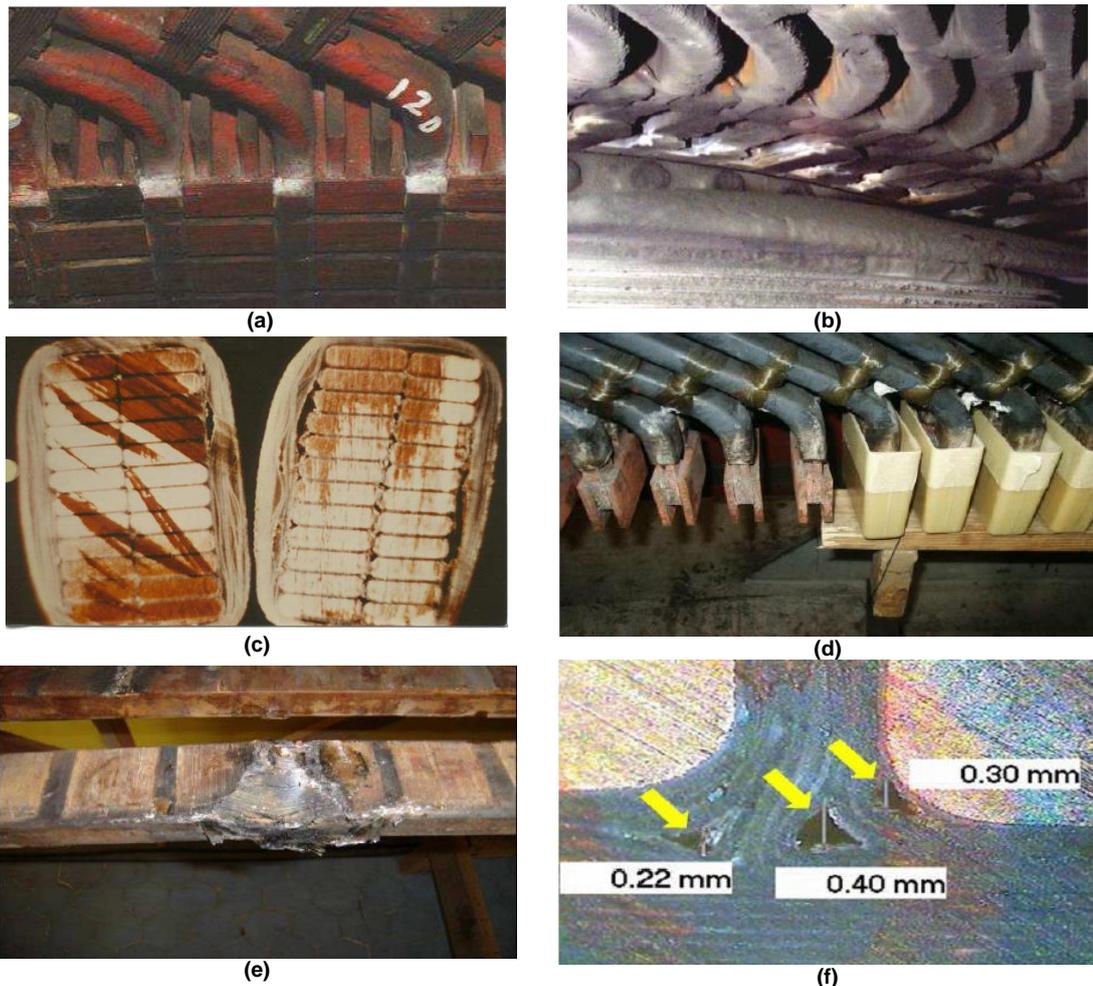


Figura 2.10 - Exemplos de Falhas em Geradores: (a) Deterioração da Interface de Alívio de Tensão; (b) Contaminação Devido à Poeira; (c) Delaminação; (d) Más Conexões Elétricas; (e) Enrolamento Solto da Ranhura; (f) Impregnação Inadequada.

Fonte: Santos, 2011, pg. 51-58

Observa-se que as falhas podem ocorrer por diversos motivos, e sem o devido monitoramento os danos ao equipamento podem ser grandiosos. Além dos exemplos de falhas mostrados na Figura 2.10 vários outros tipos de ocorrências em máquinas, podem ser detectadas mediante os testes de descargas parciais, que é um procedimento que não acarreta em grandes riscos ao gerador, fácil procedimento e não há muita dificuldade em interpretar os resultados obtidos.

Na sequência ao exposto neste capítulo, será exposto no capítulo seguinte uma visão mais clara do fenômeno das descargas parciais à fim de se mostrar a importância do acompanhamento das mesmas pela manutenção preditiva, pois testes dessa natureza são um dos mais seguros para se avaliar a situação da isolação do enrolamento estático, o qual como visto é um dos pontos da unidade geradora que mais sofre estresses.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo procurou-se estabelecer visões gerais à cerca do gerador, apresentando as partes principais constituintes da máquina, estabelecendo o foco no estator, o qual será o objeto principal de estudo quando se tratará das descargas parciais nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 03 - DESCARGAS PARCIAIS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A medição de descargas parciais já é consolidada como uma das melhores técnicas de avaliação do enrolamento estatórico, apesar de existirem algumas divergências entre os ramos prático e de pesquisa, e ainda ser um método no qual não houve expressivas evoluções tanto em segmentos de tecnologia quanto em termos analíticos dos resultados obtidos, mas nada que abale a estrutura fundamentada dos resultados das medições de DP.

Mediante esta realidade, neste capítulo se apresentará conceitos de descargas parciais, no qual se tratará não apenas os preceitos físicos e químicos do fenômeno e sim também de compreender como a medição das descargas parciais veio se consolidando ao longo do tempo.

A compreensão dos diferentes tipos de DP e como identificar as particularidades de como o fenômeno se apresenta, mostra-se um dos principais desafios para fazer diagnósticos. Por conta disso ao longo deste capítulo serão apresentados os padrões mais recorrentes de descargas parciais que ocorrem no enrolamento estatórico de máquinas rotativas, mais especificadamente em hidrogeradores.

3.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS

As definições básicas dos parâmetros associados às descargas parciais foram retirados das normas IEC 60270, IEEE Std 1434-2014, IEEE P1434/D1.1-2010 e IEEE P1434 -2014 e NBR 6940.

Estas normas estabelecem que as descargas parciais são descargas elétricas que preenchem parcialmente a isolação entre condutores e que pode ou não ocorrer junto ao condutor.

As descargas parciais são geralmente uma consequência de um estresse elétrico, geralmente pontual, concentrando na isolação ou na superfície desta. Em geral as descargas apresentam pulsos que não duram muito mais que 1 μ s. Estas podem vir acompanhadas frequentemente por emissão de sons, luzes, calor e reações químicas.

Os pulsos de corrente ou tensão que são resultantes de uma descarga parcial que ocorrem no objeto sob teste. O pulso é medido usando circuitos detectores adequados, os quais são inseridos ao circuito de teste para o propósito da medição. Uma descarga parcial ocorre no objeto de teste que produz um pulso de corrente. Um detector de acordo com as disposições padrões produz um sinal de corrente ou tensão na saída, proporcional a carga de pulso de corrente da entrada.

3.3. ASPECTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ELÉTRICOS DAS DESCARGAS PARCIAIS

Após ter-se uma visão rápida de alguns conceitos básicos a respeito das descargas parciais é crucial compreender os aspectos físicos, químicos e elétricos envolvidos em todo este fenômeno.

3.3.1. Ionização dos Átomos de Um Material Isolante

De acordo com (Nascimento *et. al*, 1990) antes de se tratar da ionização em si alguns conceitos básicos devem ser lembrados, como diferença de potencial e gradiente de potencial que são essenciais para compreender o movimento das cargas elétricas. Discutir com mais detalhes estes dois conceitos não é o escopo deste trabalho.

O fenômeno de descargas parciais decorre de uma avalanche de elétrons provocada pelo processo de ionização dos átomos que compõem um material isolante (Faier,2006). O processo de ionização e avalanche (início de descargas) de cargas satisfaz as relações de Paschen e Townsed. Porém, em ensaios práticos de DPs, as impurezas e imperfeições internas no dielétrico, distorcem as equações de Townsed, fazendo com que a tensão de *inception* possa ocorrer em tensões menores do que a tensão nominal. (Cuenca,2005).

Em termos simples o processo de ionização elétrico ocorre quando um átomo situado entre dois eletrodos é submetido à uma diferença de potencial que gera um campo elétrico (gradiente de potencial) sobre um elétron do átomo, capaz de arrancá-lo de sua órbita estável em volta do núcleo (Nascimento *et. al*, 1990).

Tem que se estabelecer a relação entre a diferença de potencial entre dois pontos a e b (V_{ab}) e o campo elétrico (\vec{E}), este dado pela equação (3.1), a qual considera um dielétrico com comportamento linear, isotrópico e sistema homogêneo. (Cuenca,2005)

$$\vec{E} = -\Delta V = -\nabla\phi \quad (3.1)$$

O campo elétrico aplicado ao material dielétrico exerce uma força nos elétrons da camada mais externa dos átomos do material isolante. Há a ocorrência de uma tentativa de extrai-los da camada de valência. No entanto, como os elétrons são fortemente unidos a seus átomos, o que ocorre é uma polarização do átomo. Ou seja, há um deslocamento de cargas positivas e negativas de suas posições de equilíbrio original para posições mais periféricas no átomo.

Os elétrons ficam sujeitos a forças contrárias ao sentido do campo e o núcleo fica sujeito a forças de mesmo sentido do campo. São estas forças que distorcem a estrutura atômica. Neste momento, os átomos comportam-se como dipolos, ou seja, os átomos comportam-se como duas cargas pontuais +q e -q. Aumentando-se o campo elétrico

(através do aumento da diferença de potencial, por exemplo), as forças internas não serão mais capazes de manter os elétrons da última camada presos aos átomos.

Haverá um desprendimento dos elétrons desta camada, assim neste momento, o átomo encontra-se com mais cargas positivas (ionizado positivamente) e o elétron liberado encontra-se livre pelo dielétrico. (Faier,2006)

Evidencia-se que quanto maior a diferença de potencial entre os dois pontos, mais intenso será o campo. Este fato justifica porque em geral materiais dielétricos (resina, vidro, mica, etc.) tem bom comportamento isolante. Na Figura 3.1 ilustra-se um átomo de material dielétrico e o deslocamento do elétron com relação ao núcleo quando ele se encontra na presença de um campo elétrico (Cuenca,2005).

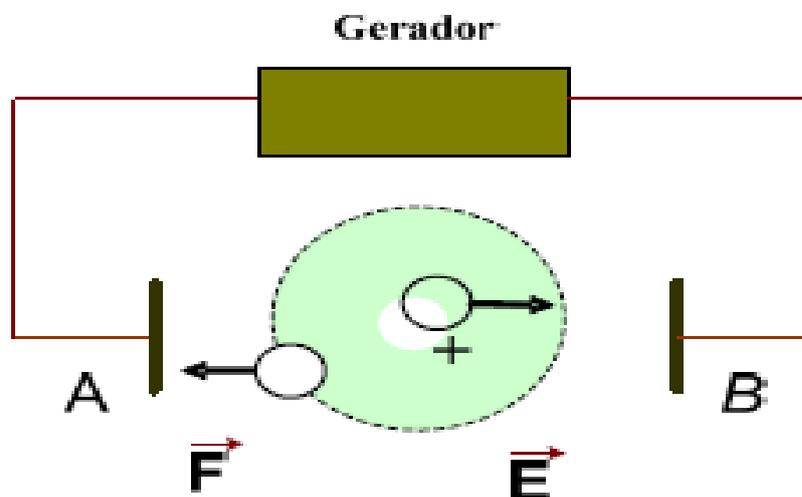


Figura 3. 1 - Forças no Átomo Quando se Aplica o Campo Elétrico
 Fonte: Adaptado de Cuenca, 2005, pg. 15

Com a tensão fornecida pelo gerador sendo elevado gradativamente, se atingirá um determinado valor, que fará com que o elétron saia de sua órbita e dirija-se a “A”. O átomo, neste instante, deixa de ser neutro e passar a ser um íon. Esse processo de ionização elétrica não é o mais importante. Cada elétron, “arrancado” de sua órbita, ao dirigir-se para o eletrodo “A” colidirá com elétrons de outros átomos e iniciará o processo de ionização por colisão, evoluindo o processo a uma avalanche de elétrons. Se a tensão tender a se elevar, a culminação deste processo resultará em um curto-circuito (Nascimento *et. al*, 1990).

Imaginando-se que o campo elétrico é produzido entre um eletrodo positivo e outro negativo, os íons positivos surgidos pelos desprendimentos dos elétrons movem-se vagorosamente na direção do eletrodo negativo. Assim, existe uma grande possibilidade de atração dos elétrons que estão vagando nas proximidades, voltando a se ter uma molécula neutra. Sabe-se que o nível de energia de uma molécula neutra é menor que o nível de energia de um íon positivo, logo, um quantum de energia deve ser liberado e irradia-se uma onda eletromagnética. A onda eletromagnética, consequência de absorção de potência da

fonte, faz surgir uma centelha. Se esta centelha não atravessar completamente o material dielétrico, o que normalmente acontece, ocorre uma descarga parcial. A Figura 3.2 exemplifica bem este processo. (Cuenca,2005)

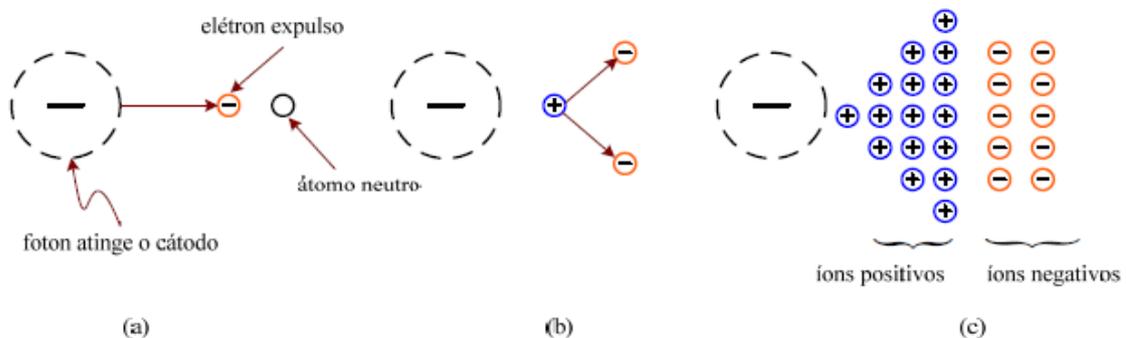


Figura 3. 2 - Processo de Avalanche de Elétrons Iniciado a Partir de um Eletrodo Negativo (a) Início. (b) Formação de um Par de Elétrons – Impacto de um Elétron com um Átomo Neutro Libera um Elétron Adicional e Deixa um Íon Positivo para Trás. (c) Multiplicação
 Fonte: Cuenca, 2005, pg. 15

Para quantificar melhor a carga, utiliza-se como unidade o Coulomb, que é equivalente a uma carga de $6,2 \times 10^{18}$ elétrons. Como um Ampère é definido como um fluxo de carga de um Coulomb por segundo, a corrente da avalanche eletrônica pode variar de $10^{-17}A$ até alguns milhares de Ampères. A energia da descarga, no entanto, é extremamente pequena quando se tenta medir a amplitude da tensão de um pulso de descarga. Se a descarga ocorrer no ar, em torno de um elemento condutor, é denominada de efeito corona, assim como *streamer* ou descarga autossustentada. (Cuenca, 2005)

Quando ocorrem descargas em uma parte de uma isolação elétrica onde não se espera que ocorram, o resultado pode ser inócua ou de efeito destruidor (Nascimento *et al*,1990). Se ocorrer este efeito destruidor o resultado pode ser irreversível e sem a chance de que uma manutenção seja feita e conserte o problema, às vezes isso ocorre quando a tensão excede o valor que o equipamento suporta, ou seja rompe sua rigidez dielétrica, que já foi explanado anteriormente, ou seja, a rigidez dielétrica nada mais é que máximo gradiente de potencial que o material suporta sem que ocorra um curto. (Cuenca, 2005)

3.3.2. O Campo Elétrico, o Meio em que se Encontra e a Geometria dos Eletrodos

A intensidade do campo elétrico está relacionada basicamente com o valor de tensão, com o meio em que ele se encontra e com a geometria do conjunto eletrodos/dielétrico em que ele atua (Cuenca, 2005)

Apesar de não fazer parte do objetivo do trabalho é importante compreender aspectos básicos do campo elétrico como relações de fronteira entre dois meios dielétricos diferentes, as características dos dielétricos envolvidos tal como a permissividade, são conceitos

básicos provenientes do eletromagnetismo que serão de grande valia para a compreensão das descargas parciais.

As relações de fronteira levam em consideração características cruciais em um dielétrico como a permissividade (ϵ). A permissividade do dielétrico é sempre maior que a permissividade do vácuo, o que implica em muitas vezes se utilizar a permissividade relativa do dielétrico, o que nada mais é que a razão entre a permissividade do dielétrico e a permissividade do vácuo, este valor de permissividade do vácuo corresponde a $8,85\text{pFm}^{-1}$, ressalta-se que o resultado desta razão gera um valor adimensional, tal apresentada pela equação 3.2:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.2)$$

Vários valores da permissividade relativa dos dielétricos já são tabelados, estes valores são válidos para campos estáticos ou em baixas frequências, entretanto são valores aproximados, na Tabela 3. observa-se parte da gama destes dielétricos.

A permissividade relativa é um meio de se estabelecer um nível de isolamento de um material dielétrico. Quanto maior a permissividade relativa deste material, mais suportável à tensão é o material, isto se for considerado um campo elétrico uniforme e na faixa dos 20°C . Para frequências maiores estes valores de permissividade tendem a variar, o que pode apresentar outros modos ressonantes, tais ocasionados pelos diversos modos de vibração.

O autor Walter M. H. Cuenca considera dois meios dielétricos de permissividade ϵ_1 e ϵ_2 separados por uma fronteira plana, e supõe que os dois meios são isolantes perfeitos, e que as componentes tangenciais do campo elétrico são iguais nos dois lados da fronteira, como mostram a Figura 3.3. Isso significa que o campo elétrico tangencial é contínuo através dessa fronteira.

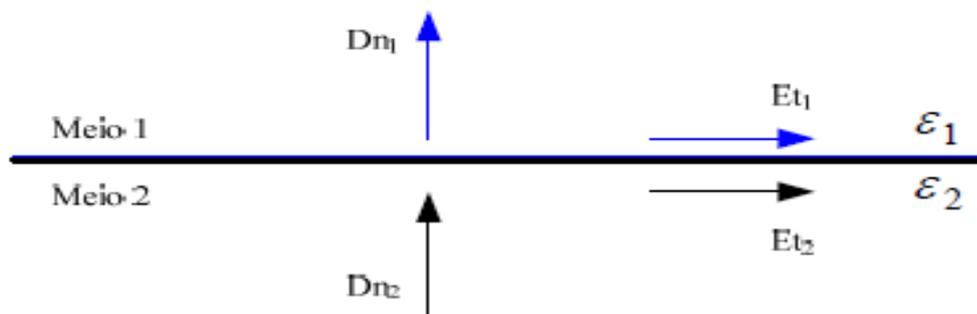


Figura 3.3 - Fronteira Entre Dois Meios Dielétricos Diferentes
Fonte: Cuenca, 2005, pg.19

Frisa-se que ao determinar as condições de fronteira utiliza-se as equações de Maxwell, estas apresentadas nas equações 3.3 e 3.4. (Sadiku,2004)

$$\oint E * dl = 0 \quad (3.3)$$

$$\oint D \cdot dS = Q_{enc} \quad (3.4)$$

Além disso decompõe-se a intensidade do campo elétrico E em suas duas componentes ortogonais, as quais E_t e E_n representam respectivamente as componentes tangencial e normal do campo elétrico, para melhor exemplificação esta é apresentada na equação 3.5.

$$E = E_t + E_n \quad (3.5)$$

Tratando-se das componentes normais, é interessante utilizar a densidade de fluxo elétrico, já que a componente normal é contínua através da fronteira desprovida de carga entre dois dielétricos, uma decomposição semelhante a feita com o campo elétrico é realizada para obter a relação da densidade de fluxo. Como trata-se de uma fronteira livre, ou seja, densidade de carga (ρ_s) = 0, a equação a se trabalhar se resume a apresentada pelas equações 3.6 e 3.7. (Cuenca 2005), (Sadiku, 2004)

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_1 * E_{1n} = \varepsilon_2 * E_{2n} \quad (3.7)$$

De acordo com a equação 3.7, verifica-se que os campos elétricos normais à fronteira estão inversamente relacionados com as permissividades relativas ε_1 e ε_2 . Se o meio 1 tiver uma permissividade relativa menor que a do meio 2, o campo elétrico no meio 1 será maior que no meio 2, implicando que a componente normal D é contínua através da interface, contudo, a componente normal de E não o é. Ainda de posse das condições de fronteira, é possível se estabelecer também a refração da interface (Cuenca 2005), (Sadiku, 2004).

A intensidade máxima do campo que um dielétrico pode vir a suportar ou a qual pode ser submetido sem que haja ruptura ou centelhamento é estabelecida pela rigidez dielétrica. Na Tabela 3.1 são apresentados alguns valores de materiais dielétricos e seus valores de rigidez dielétrica, tais submetidos a campo uniforme.

Tabela 3.1 - Permissividade relativa (ε_r) e rigidez dielétrica de alguns materiais de uso corrente

MEIO	PERMISSIVIDADE RELATIVA (ε_r)	RIGIDEZ DIELÉTRICA E (MV/m)
Vácuo	1	3
Ar (1atm)	1,0006	3
Borracha	3,1	25
Mica	6	70
Vidro	5-10	35
Papel	7	12
Parafina	2,2	30
Petróleo	2,1	12

Fonte: Sadiku,2004, pg. 661

A geometria dos eletrodos influencia diretamente a distribuição da intensidade do campo elétrico. O gradiente de tensão aumenta quanto menor for a área do eletrodo. Se o formato do eletrodo for uma ponta, o gradiente de tensão é alto. Se, para o mesmo nível de tensão aplicada, o eletrodo tiver um formato plano, o gradiente de tensão é bem menor. A Figura 3.4 ilustra um exemplo de eletrodo ponta-plano tendo um gás como dielétrico.

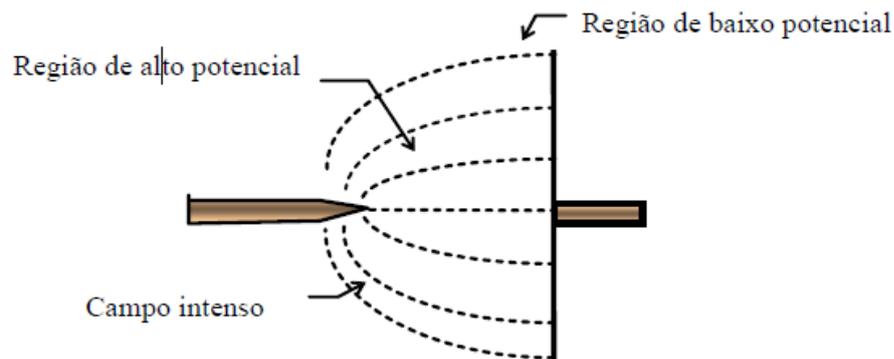


Figura 3.4- Eletrodo Ponta-Plano
Fonte: Cuenca, 2005, pg. 20

Perto da ponta, como o gradiente de potencial é maior, a intensidade do campo elétrico é maior conseqüentemente, como foi mostrado pela Equação 3.3. O elétron que está perto da ponta pode então ser acelerado até adquirir energia cinética suficiente para causar uma ionização. Perto do plano, a intensidade do campo elétrico é menor e o elétron pode não adquirir energia cinética suficiente para causar uma ionização. Logo, a descarga é limitada a um volume perto da ponta. O volume de gás restante entre o plano e a descarga funciona como uma excelente resistência, limitando o centelhamento. (Cuenca,2005)

3.4. TIPOS DE OCORRÊNCIAS

Julgava-se a isolação elétrica apenas por questões de resistência de isolamento e a rigidez dielétrica do material pretendido para isolação. Com avanço tecnológico e a utilização constante de tensões de alta e extra alta tensão, ainda tem-se a realidade em que se tornou imprescindível a redução de custos na fabricação dos equipamentos, bem como tentar reduzir ao máximo ações de manutenções desnecessárias, e em contrapartida os equipamentos são exigidos cada vez mais às vezes até chegarem perto do seu limiar de operação.

Diante deste cenário é importante manter níveis de controle de qualidade altíssimos e isolação mais efetiva, além de que exercer uma linha maior de monitoramento nos equipamentos.

Neste tópicos a explanação principal será a respeito da compreensão dos tipos de descargas parciais, o circuito equivalente e os mapas estatísticos, noções a respeito das linhas de monitoramento só serão abordados no capítulo subsequente.

3.4.1. Definição e Localização das Descargas Parciais

Um dos termos citados por (Stone,1986) diz que as descargas parciais são “faíscas” envolvidas em um fluxo de elétrons e íons em pequenos volumes de ar avariados, seria as bolhas na isolação. A descarga é parcial uma vez que exista um isolamento sólido, tal como epóxi mica, em série com a descarga parcial, o que evita avaria. Em resumo as descargas em geradores podem ocorrer entre a isolação principal e o cobre, em vazios ou na delaminação da isolação externa (*ground-wall*) principal da isolação, na área da cabeça da bobina rastreável ou entre diferentes fases bloqueadas, ou ainda na junção defeituosa entre camada de estresse da cabeça da bobina e o revestimento da ranhura condutora.

É importante reforçar que nem sempre é necessário que ambos os eletrodos sejam metálicos, as descargas podem ocorrer até mesmo entre dois isolantes se eles estiverem agindo como eletrodos.

Ao longo da barra/bobina, as descargas parciais podem ocorrer nas superfícies externas e em vazios existentes entre condutores, entre condutores e isolamento terra, vazios existentes entre isolamento terra e a camada semi-condutiva, enfim, configura-se como vazio um defeito no sistema de isolamento que se caracteriza como um espaço não impregnado por material isolante e que pode enclausurar gases provenientes do material isolante. A Figura 3.5 ilustra uma secção transversal de uma barra indicando seus componentes.

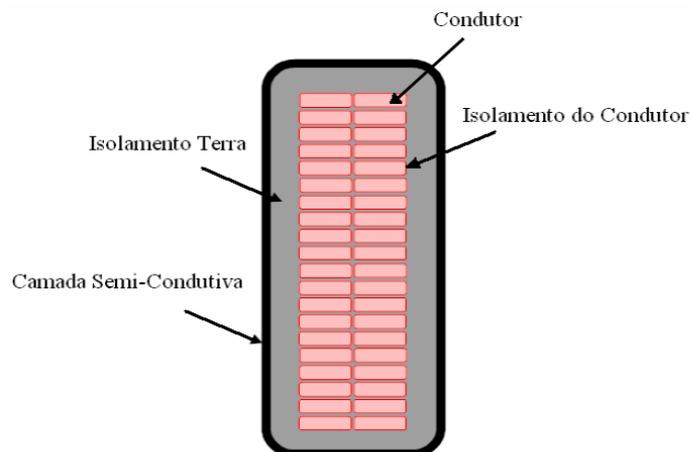


Figura 3.5 - Secção Transversal da Barra
 Fonte: Leal, 2009, pg.02

De acordo com o autor Guilherme C. da Silva e este embasado por diversos autores como Kreuger, Mason e Gulski têm-se a seguinte definição para os tipos básicos de descargas parciais (Silva, 2005):

“Descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Quando a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede um certo valor crítico o processo de descarga superficial é iniciado [Gulski, 1995a]. Descargas superficiais ocasionam alterações na superfície do dielétrico, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Este fenômeno, conhecido como trilhamento, pode levar à ruptura completa da isolação [Mason, 1995]. Este tipo de descarga normalmente ocorre em cabos protegidos e terminações de cabos isolados, em saias de isoladores e no sistema de alívio de barras de geradores [Kreuger, 1989].

Descargas corona ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos. Estes pontos concentradores de estresse, ou seja, partes com pequenos raios de curvatura, formam regiões nas vizinhanças do condutor com campo elétrico elevado, o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás, dando origem a ocorrência de descargas parciais [Kreuger, 1989]. Descargas corona no ar geram ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolação polimérica. Óxidos de nitrogênio combinados com vapor de água podem corroer metais e formar depósitos condutores na isolação promovendo o trilhamento do material [Mason, 1995].

Descargas internas ocorrem em inclusões de baixa rigidez dielétrica, geralmente vazios preenchidos com gás, presentes em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de isolação de alta tensão [Kreuger, 1989]. A formação de vazios na estrutura de materiais poliméricos pode ser devida a causas distintas, dependendo da natureza do material e do processo de fabricação. No caso de materiais termoplásticos como, por exemplo, o polietileno, a falha pode ocorrer durante o processo de injeção do polímero devido à infiltração do ar atmosférico. Para polímeros termo fixos, tais como as resinas epóxi, a formação dos vazios pode ocorrer durante o processo de cura do material, podendo ser devido à infiltração do ar atmosférico ou a

formação de gases residuais provenientes de reações químicas [Boggs, 1990]. Além dos fatores relativos ao processo de fabricação, os diversos estresses a que a isolamento é submetida ao longo de sua vida também podem causar o aparecimento de vazios [Gjaerde, 1997].

Descargas internas podem ocorrer numa região do material dielétrico onde o vazio está totalmente circundado pelo dielétrico ou na interface entre o dielétrico e um dos eletrodos [Kreuger, 1989]. Um tipo particular de descargas internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas. A arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no interior da isolamento de equipamentos elétricos, tais como cabos de potência isolados, tendo sua origem devido à ocorrência contínua de descargas parciais internas em vazios ou a partir de uma falha no eletrodo [Kreuger, 1989, Dissado, 1992].”

A Figura 3.6 tem o objetivo de deixar mais claro estes conceitos.

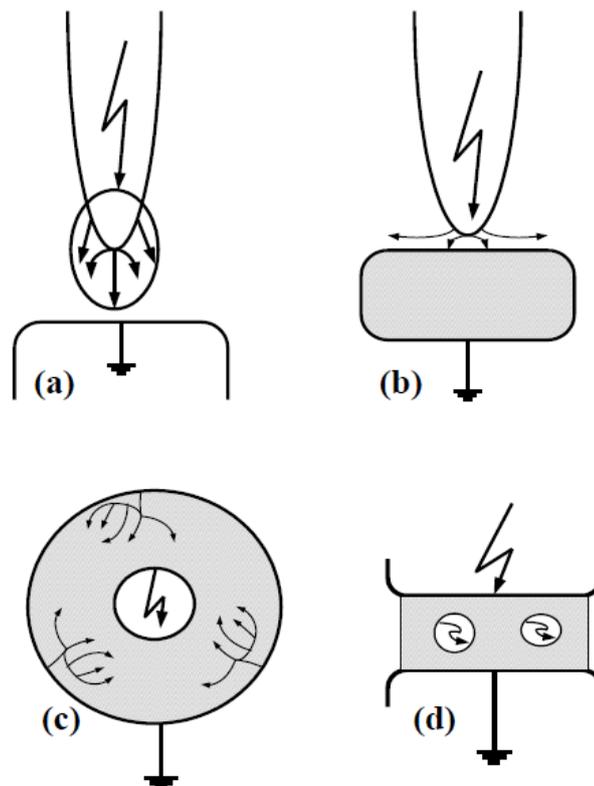


Figura 3.6 - Tipos de Descarga Parciais: (a) Corona, (b) Superficial, (c) Arborescência Elétrica, (d) Interna
 Fonte: Sabat, 2011, pg.08

Um meio também de se compreender os tipos de descargas parciais seria através da norma IEC 60034-27-2 que afirma que as fontes de descargas parciais em hidrogeradores

podem ser estabelecidas como descargas internas, descargas de ranhura, descargas nas cabeças da bobina e descargas por partículas condutivas. Tal foi bem exemplificada por (Brasil,2013), o qual será a fonte principal para compreensão nestes detalhes apresentados, já que o autor mostra de forma simples e concisa cada caso específico.

3.4.2. Classificação das DPs

3.4.2.1. Descargas Internas

3.4.2.1.1. Cavidades Internas

Tem-se que uma isolação perfeita é quase impossível, no entanto tenta-se de todo modo que ela seja a mais perfeita possível, e que toda ou quase toda cavidade interna possa ser extinta.

Um exemplo simples é o sistema de isolação composto de folhas de mica, tecido de fibra de vidro impregnado com resina sintética, tal utilizado em máquinas rotativas de alta tensão. A mica que é presente no sistema de isolação impede na maioria das vezes que haja uma evolução das descargas parciais, e se essas cavidades forem mínimas a confiabilidade do equipamento não é afetada.

3.4.2.1.2. Delaminação Interna

A delaminação interna no isolamento do estator pode ser causada durante o processo de fabricação ou pelo sobreaquecimento das bobinas, à medida que o sistema de isolação é exposto continuamente a esse sobreaquecimento, as resinas orgânicas tendem a perder sua rigidez mecânica, acarretando um fenômeno conhecido como delaminação das camadas.

Quando ocorre a delaminação das camadas da isolação, os condutores internos de cobre ficam livres para vibrar e então ocorrem descargas parciais de alta energia que podem comprometer significativamente a isolação.

A delaminação irá reduzir a condutividade térmica da isolação o que pode levar a o envelhecimento acelerado, por esse motivo a delaminação necessita de atenção especial quando esse tipo de DPs for detectado.

3.4.2.1.3. Delaminação entre Condutores e a Isolação

O ciclo térmico pode causar delaminação na interface do condutor e a isolação principal. Esse processo de delaminação pode resultar em descargas parciais que rapidamente podem levar a falha especialmente em bobinas de múltiplas espiras.

3.4.2.1.4. Arborescência (*Treeing*) Elétrica

Em materiais isolantes sólidos podem ocorrer também as descargas contínuas que deterioram parcialmente o material isolante geralmente denominadas descargas *treeing* ou *treeing channels*, que se propagam em volta do isolamento sólido similar aos encontrados em barras de gerador (Cuenca,2005).

A arborescência elétrica na isolação da máquina é um processo de envelhecimento em que finos canais se propagam através do epóxi em torno das barreiras de mica e pode finalmente levar a falha elétrica do isolamento principal. Esse processo é associado a atividade de descargas parciais internas (Brasil, 2013).

3.4.2.2. Descargas de Ranhura (*Slot Discharges*)

Descargas de ranhura em hidrogeradores ocorrem quando o revestimento da parte condutiva na ranhura se danifica devido ao movimento da barra ou bobina na ranhura. Altos níveis de descargas aparecerão quando sérios danos mecânicos já estão presentes, que pode resultar em um dano adicional à isolação principal e eventualmente em uma falha na isolação. As descargas de ranhura são geralmente causadas pela concentração de campo elétrico local, esse processo ocorre apenas nos terminais de alta tensão de cada fase.

O tempo absoluto entre a detecção deste fenômeno e a falha total da isolação geralmente é desconhecido. Entretanto, comparado com outros efeitos de deterioração típicos esse tempo geralmente pode ser curto, especialmente na presença da vibração das barras ou bobinas. Deste modo, uma detecção confiável nos estágios iniciais se faz necessária para decidir que ações de manutenção devem ser tomadas.

3.4.2.3. Descargas na Cabeça da Bobina (*End-Winding*)

Descargas corona na área da cabeça da bobina podem ocorrer em diversos locais com alta concentração de campo elétrico. Tais descargas normalmente ocorrem nas interfaces entre diferentes elementos da cabeça da bobina dos enrolamentos do estator.

3.4.2.3.1. Descargas de Superfície

As descargas de superfície geralmente se iniciam quando o campo elétrico ao longo da superfície excede o valor da rigidez dielétrica do gás ou líquido que está ao redor. Esse fenômeno pode acontecer quando nenhum revestimento para controle de estresse for aplicado na cabeça da bobina ou o revestimento aplicado se tornar ineficiente devido a contaminação por sujeira ou umidade, porosidade, efeitos térmicos, entre outros.

Este tipo de descarga normalmente é um mecanismo de falha muito lento, mesmo que o comportamento das DPs esteja sujeito a alterações relativamente rápidas devido aos

efeitos da superfície. Descargas de superfície normalmente resultam em uma falta fase-terra.

3.4.2.3.2. Descargas entre Fases

Descargas parciais podem ocorrer entre fases, por exemplo, devido a inadequada distância de isolamento entre fases ou utilização de sistemas suporte da cabeça da bobina inadequado. Dependendo do projeto essas descargas podem ter magnitudes elevadas e podem ocorrer como descargas de superfícies ou descargas internas. Descargas entre fases podem resultar em uma falha fase-fase.

3.4.2.4 Partículas Condutivas

A presença de partículas condutivas, especialmente pequenas partículas, por exemplo, devido à contaminação do enrolamento, podem resultar em uma grande concentração de descargas parciais. Isso pode resultar em pequenas cavidades na isolação.

A Figura 3.7 exemplifica um pouco melhor a localização de onde pode as descargas ocorrerem, que foi retirado de (Taylor,2010) e a figura adaptada por (Brasil,2013), importante frisar que a descarga parcial quanto mais externa, ou seja, mais próxima da ranhura mais grave ela tende a ser a isolação do equipamento.

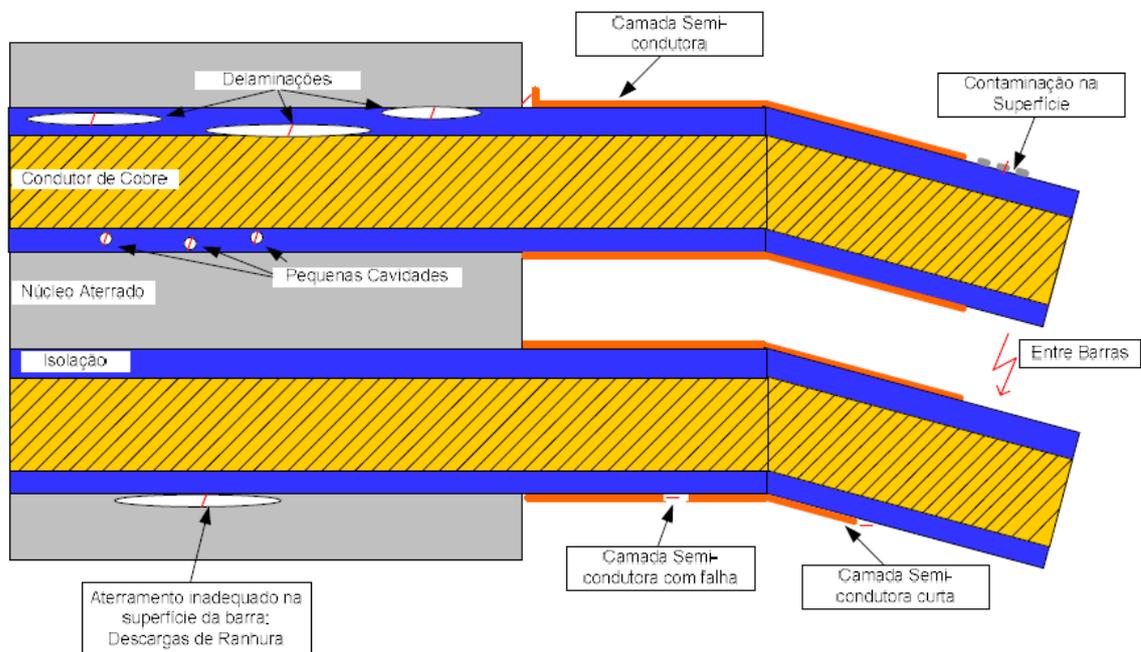


Figura 3.7 - Fontes de Descargas Parciais no Isolamento do Estator
Fonte: Brasil, 2013, pg.28

3.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DO PROCESSO FÍSICO DA DESCARGA PARCIAL EM CAVIDADES

Como já previamente citado sempre que houver uma cavidade, seja no interior ou na superfície de uma isolação, pode acarretar uma culminação de descargas parciais, pois haverá diferença de potencial através desta. O quanto será essa diferença dependerá da tensão aplicada nos terminais e da capacitância da cavidade (Brasil,2013).

Importante lembrar o conceito de rigidez dielétrica, introduzido por Maxwell, que estabelece uma relação entre a tensão que produz a disrupção entre dois eletrodos e a distância entre eles e é válida para campos uniformes. Que é dado pela equação 3.8, na qual a rigidez é a razão entre a tensão disruptiva e a distância, dada em kV/cm.

$$E = \frac{V_d}{d} \quad (3.8)$$

Ainda nesta linha crucial citar a conhecida Lei de Paschen que correlaciona a tensão de ruptura de um gás ao produto entre sua pressão e a distância entre os eletrodos, tem-se uma correlação com as descargas parciais, ou seja, a descarga parcial ocorrerá quando houver estresse elétrico, o qual deve exceder a tensão de ruptura, que é melhor compreendido ao se comparar à equação 3.9 e à Figura 3.8, a qual apresenta a curva característica desta Lei. (Schneider,2013)

$$V = f(pd) \quad (3.9)$$

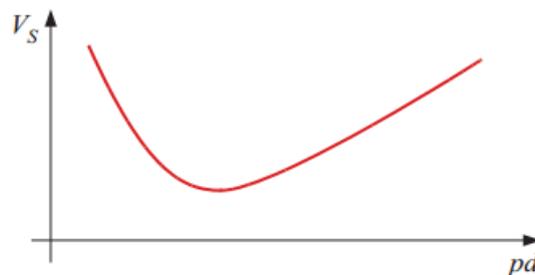


Figura 3.8 - Curva Lei de Paschen
Fonte: Zurita, 2011, pg. 06

Com o intuito de se explicar da forma mais simples possível, já que o sistema ao entrar em mais detalhes se torna ligeiramente mais complexo, considera-se um trecho de um isolante que apresente apenas uma cavidade com falha de fabricação como mostrado na Figura 3.9 (a).

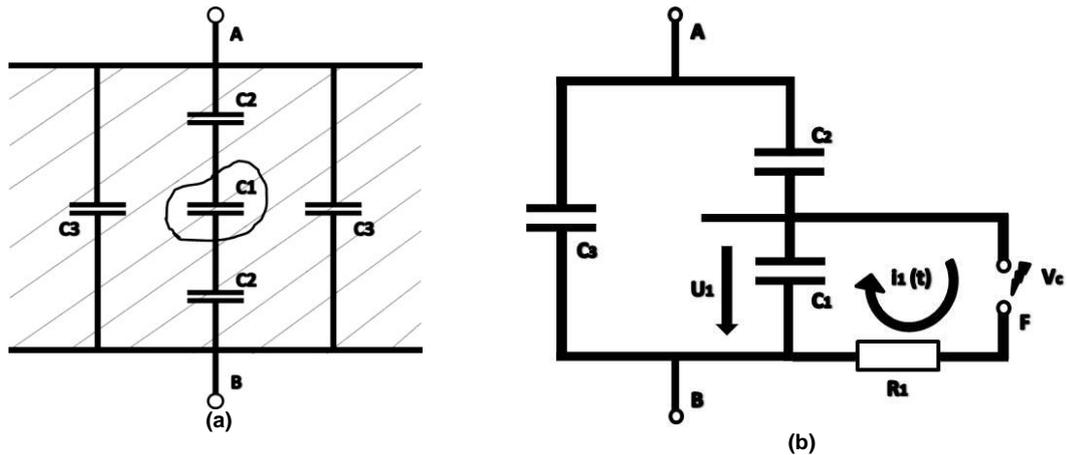


Figura 3.9 - Trecho de Isolante com Cavidade: (a) Isolante com Falha de Fabricação; (b) Circuito Equivalente

Fonte: Adaptado de Nascimento *et. al*,1990,pg.14

Para o circuito equivalente mostrado pela Figura 3.9(b), que é uma modelagem do dielétrico, C1 representa a capacitância da cavidade do dielétrico. C2 é a capacitância equivalente nos capacitores C2 em série com C1. C3 é a capacitância equivalente do trecho livre de descarga em toda a extensão entre dois eletrodos A e B. A tensão sobre o dielétrico tem o aspecto mostrado pela Figura 3.10 (Nascimento *et. al*,1990).

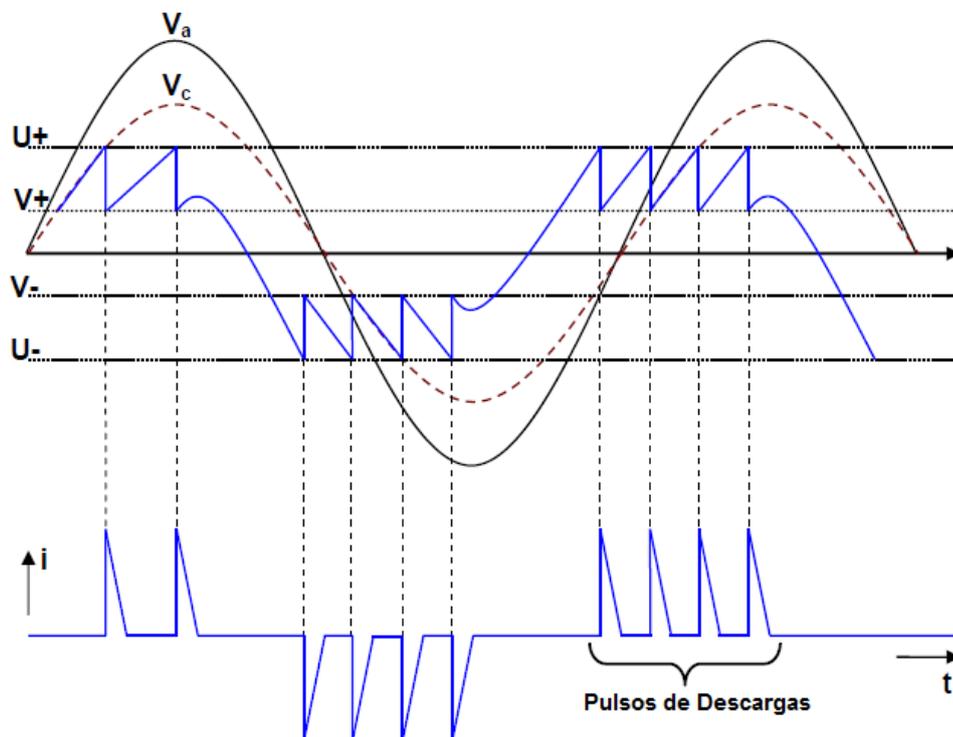


Figura 3.10 – Sequência de Descargas Internas sob Tensão Alternada

Fonte: Adaptado de Joshi, 2011, pg.35

Sendo V_a a tensão senoidal da fonte aplicada aos terminais A e B e V_c a tensão a que estaria submetida a cavidade e que deveria ser suportada por esta, no entanto em função de fatores tais como dimensão da cavidade, tipo e pressão de gás na cavidade,

temperatura, umidade, etc., a máxima tensão suportável pelo dielétrico no ciclo positivo é U_+ (rigidez dielétrica), sendo esta tensão U_+ dada pela curva de Paschen.

Quando a tensão atingir este valor, ocorre a descarga e a tensão na cavidade cai a um valor de V_+ , que é a tensão de extinção de descarga na cavidade, tem essa denominação, pois não é suficiente para sustentar o arco. Esta queda de tensão pode ser considerada como uma função degrau, pois se desenvolve em menos de 100 nanossegundos, tal intervalo de tempo que é muito menor do que o período da onda senoidal de 60Hz. Neste momento ela volta a crescer até U_+ , quando ocorre uma nova descarga. Este processo se repete até a mudança do sinal da taxa de variação da tensão (dv/dt).

Neste novo momento, a tensão na cavidade volta a crescer até U_- , sendo o tempo de subida da tensão na cavidade, determinado pela superposição de dois campos elétricos em oposição (o campo criado pela fonte que é o principal e aquele criado pelas descargas superficiais deixadas nas paredes da cavidade após a última descarga). Quando a tensão atingir o valor de U_- , atinge-se o valor da rigidez dielétrica da cavidade e nova descarga se inicia.

A taxa de frequência de pulsos não segue um princípio teórico e, conseqüentemente, varia bastante. Dentre um semi-período da tensão da fonte, uma ou várias descargas podem ocorrer, dependendo da magnitude da tensão da fonte, do tipo de falha e da localização no dielétrico.

Em geral, a maior taxa de descarga é observada durante a maior variação de tensão (dv/dt), portanto, a polaridade dos pulsos não depende da polaridade da tensão de teste, mas somente do sinal de variação da tensão (dv/dt).

Em outra linha visionária, as descargas do tipo corona (externas) aparecem tipicamente no valor de pico da tensão da fonte, independentemente de ser no ciclo positivo ou negativo e, o sinal dos pulsos correspondem ao sinal da tensão de fonte (Nascimento *et. al*,1990), (Campos,1983).

Uma observação é a respeito da carga envolvida no fenômeno que é apresentada na equação 3.10: (Campos,1983).

$$\Delta q = \left(C_3 + \frac{C_2 * C_1}{C_2 + C_1} \right) * V - (C_3 + C_2) * V_1 \quad (3.10)$$

Como $C_3 \gg C_2$ e $C_2 \gg C_1$ chega-se as equações 3.11 e 3.12.

$$\Delta q = C_3 * (V - V_1) \quad (3.11)$$

$$\Delta q = C_3 * \Delta V \quad (3.12)$$

No qual:

- V é a tensão terminal antes da descarga;
- V_1 é a tensão terminal durante a descarga;

- Δq é a carga transferida durante a descarga;

Diante de tal pode-se calcular a variação de carga apenas pela tensão no capacitor C_3 . Esta a qual é conhecida como carga aparente da descarga parcial, a carga real é dada pela equação 3.13.

$$q = (C_2 + C_1) * V_{1c} \quad (3.13)$$

Em que V_{1c} representa a queda de tensão ocorrida na cavidade ou capacitância C_1 , frisa-se que esta carga não pode ser medida diretamente por nenhum medidor de DP (Brasil,2013).

Para ocasionar a medição desse sinal de DP analisa-se a corrente e a tensão no qual o teste é submetido, como a capacitância da cavidade é mínima quando se relaciona com a capacitância do dielétrico, a queda de tensão durante a descarga é pequena já que esta segue na ordem de mV e a tensão aplicada gira na casa dos kV, para tal medição desta queda de tensão na concavidade e levando em conta que as componentes são de alta frequência utiliza-se um filtro passa alta acoplado com o dispositivo de medição. Evidencia-se que tais detalhes das medições serão abordados no capítulo seguinte.

O pulso de uma descarga parcial tem um tempo de subida extremamente rápido como já citado anteriormente e tem uma largura de banda curta. Constantes como o tempo de subida, período de oscilações, picos são bem variados de acordo com cada pulso, isto vem do fato que esses resultados dependem da máquina analisada, da localização dos pulsos, tipo de material utilizado na isolação, etc.

Os espectros de frequência variam de DC a GHz, o que implica que é possível enxergar as descargas ocorrendo em várias faixas distintas, o que têm seus lados positivos e negativos, mas há um agravante, pois torna-se quase impossível detectar toda e qualquer atividade de descargas parciais e conseqüentemente a energia dissipada por elas por instrumentos utilizados neste tipo de detecção.

A grande maioria dos equipamentos de detecção de DPs detecta o início do pulso, este que apresenta um tempo de subida de 1 a 5 ns. Considerando-se o tempo de subida aproximado, a frequência se estabelece através da equação 3.14:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 * t_{sub}} \quad (3.14)$$

No qual:

- f é a frequência;

- T é o período;

- t_{sub} é o tempo de subida.

Um exemplo simples é se estabelecer um pulso com tempo de subida de 2ns, o que implicaria em um período de 8ns e conseqüentemente uma frequência de 125MHz. Como o

tempo varia de 1 a 5 ns este corresponde a uma faixa de frequência de 50-250Mhz. Na Figura 3.11 apresenta-se um pulso típico de descarga parcial. (Brasil,2013)

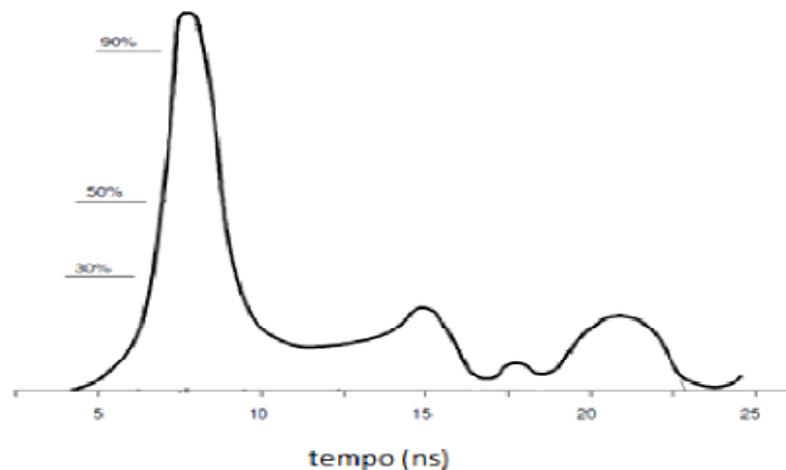


Figura 3.11 - Pulso de Descarga Parcial
Fonte: Brasil, 2013, pg.20

Como citado o pulso da descarga parcial tem um tempo de subida de 5 nanossegundos ou menos, e o pulso possui duração de 0,5 à 5 microssegundos, isso implicará do tipo de enrolamento do gerador requerido para análise e o tipo de detector utilizado, sendo que interferências elétricas podem ocorrer e estas geralmente possuem um formato de:

- Pulsos de excitação estáticos provenientes de um transformador de serviço;
- Arco nas escovas (*brushgear*);
- Descargas do sistema de potência;
- E outros sinais de RF (rádio frequência) que acabam aparecendo na via do sistema de potência. (Stone,1986)

Quando ocorre um pulso ele se desloca até determinado ponto para ser detectado pelo sensor, tais pulsos se movimentam através do enrolamento do estator de três maneiras distintas: transmissão, acoplamento capacitivo e radiação.

Ao se tratar da transmissão tem-se que ter em mente que este pulso navega através dos condutores de cobre, o sinal se assemelha aos de frequência industrial que gira em torno de 50/60 Hz. Obviamente há distorções no sinal, este o qual tende a atenuar e apresentar um maior tempo de subida. Pelo fato de a impedância indutiva da bobina ser muito superior quando ocorre um pulso de magnitude alta de frequência do que quando ela está submetida a uma frequência de 50/60 Hz pode-se compreender que os pulsos das descargas parciais não viajam grandes distâncias pela transmissão através do enrolamento do estator, ao serem detectados (encontrados), a distorção ocorre após terem atravessado apenas algumas bobinas.

Apesar destas características durante a transmissão, duas condições contribuem para o surgimento das DPs: a primeira seria o envelhecimento, isto é, o desenvolvimento de um

defeito mecânico normalmente afeta todas as bobinas em algum grau; e a segunda, é que as DPs somente podem ocorrer quando existe estresse de tensão fase-terra suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar dentro das cavidades. Esta situação ocorre apenas nas bobinas que estão submetidas à alta tensão.

Assim, a medição das DPs nas bobinas submetidas à alta tensão irá indicar envelhecimento típico nas bobinas com maiores riscos, isto é, as bobinas submetidas a alta tensão. O que não pode ser detectado devido às distorções dos pulsos de DPs é uma falha em uma bobina de baixa tensão.

Em contrapartida a transmissão, tem-se o acoplamento capacitivo, este que pelo que o próprio nome indica o sinal viaja através dos capacitores, neste o qual a relação torna-se inversa ao do caso anterior, a impedância capacitiva submetida a uma frequência na casa dos MHz, devido aos pulsos de DPs, será muito inferior a impedância capacitiva do que quando submetida a uma frequência industrial (50/60 Hz).

Para sinais de altas frequências, um capacitor aparece como um curto circuito permitindo que a corrente atravessasse sem impedimentos. Embora essa seja a detecção ideal para as DPs, uma vez que elas viajarão sem distorções pelos enrolamentos do estator, a utilização deste acoplamento capacitivo é impossível.

A capacitância é a grandeza escalar determinada pela quantidade de energia elétrica que pode ser acumulada em si por uma determinada tensão e pela quantidade de corrente alternada que atravessa um capacitor numa determinada frequência. Um capacitor consiste de duas placas de metal separadas através de uma distância específica por um dielétrico, como um material isolante ou o ar, que se exemplifica através da Figura 3.12.

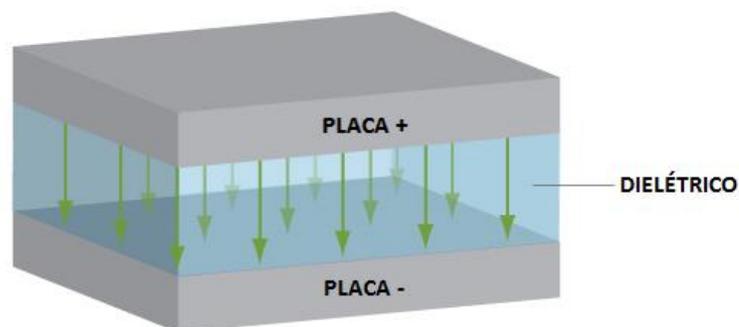


Figura 3.12 – Capacitor
Fonte: (Eletrônica Didática, 2013)

De acordo com (Brasil, 2013) o problema com o comportamento do pulso no enrolamento é que a quantidade e magnitude dos elementos capacitivos são desconhecidos, pois existe capacitância:

- Entre cada bobina e o condutor e o núcleo;

- Entre os anéis de circuito com isolamento e ar como dielétrico;
- No final de duas bobinas adjacentes com o ar.

A magnitude dessas capacitâncias, depende da espessura da isolamento, do espaço de separação e da integridade da resina orgânica, e todas essas características mudam constantemente com a temperatura, umidade e carga do sistema.

Embora se tenha conhecimento de que o acoplamento capacitivo ocorre e que pode ser detectado, não é possível afirmar de como o pulso irá se acoplar capacitivamente através de um enrolamento. Entretanto, uma vez que o comportamento deste pulso é estudado através de testes empíricos, ele pode ser monitorado.

Por fim ainda há a radiação, a qual ao se colocar uma antena de rádio frequência próxima ao ponto de ocorrência de descargas parciais irá ser detectada a perturbação, a dificuldade no método está em que o pulso se distorce rapidamente e perde a sua identidade em altas frequências, para se assegurar que o pulso detectado é de descarga parcial a antena deve ser situada próxima da fonte de DP, ou seja nas bobinas de alta tensão.

3.6. LIMITES ACEITÁVEIS PARA VALORES DE DESCARGA PARCIAL EM ESTADORES DE MOTORES E GERADORES

Enrolamentos estáticos de máquinas elétricas como motores e geradores não possuem valores padronizados de magnitudes de descargas parciais na norma, o que dificulta na maioria das vezes se estabelecer um diagnóstico, e em muitos momentos este é empírico.

Um dos principais motivos de não haver esses limites aceitáveis de magnitude de descargas parciais é pelo fato de o estator ser bastante complexo em âmbitos mecânicos e elétricos. Pelo fato de não ser uma capacitância pura, dificulta haver um padrão em termos de quantidade absoluta, como a estabelecida por picocoulomb.

Cada máquina é única, o que conseqüentemente apresenta certas particularidades elétricas do seu enrolamento, devido a geometria e níveis de operação, o que impede às vezes de se estabelecer comparações com outras máquinas, pois ao se realizar testes de medição de descargas parciais os valores serão bastante individualizados, se houver questões de comparação deve-se fazer as devidas considerações a respeito de cada máquina.

Para tentar amenizar este problema a *IRIS POWER ENGINEERING*, empresa pertencente ao grupo Qualitrol que é a maior e empresa-líder de mercado no segmento de medição de descargas parciais, por conta de toda sua experiência de mercado comercial e sendo uma das empresas de maior notoriedade no ramo de medições de descarga parcial,

esta analisou cerca de 14000 testes o que resultou na Tabela 3.2 e Tabela 3.3 as quais apresentam as magnitudes aceitáveis de DP para máquinas refrigeradas a ar e máquinas com refrigeração a hidrogênio, respectivamente. (Warren *et. al*, 1999)

Tabela 3. 2 - Máquinas Refrigeradas a Ar - Qm(mV) para Barra & Anel Medidos com PDA-IV ou TGA

Tensão Nominal (kV)	<7	10-15	>15
Bom (mV)	<60	<170	<300
Mau (mV)	>140	>400	>600

Fonte: Warren *et. al*, 1999

Tabela 3.3 - Máquinas Refrigeradas a Hidrogênio - Qm(mV) para Barra & Anel Medidos com PDA-IV ou TGA

Tensão Nominal (kV)	<15	15-18	>18
Bom (mV)	-	<20	<40
Mau (mV)	-	>150	>90

Fonte: Warren *et. al*, 1999

Em relação as Tabelas 3.2 e 3.3 é possível dar mais aporte ao entendimento com os seguintes conceitos:

- **Anel ou Diferencial:** Método de instalação de acopladores, é requerido a instalação de dois acopladores de 80pF nos extremos opostos do anel (Grandes Hidrogeradores);
- **Barra ou Direcional:** Necessário a instalação de dois acopladores de 80pF por fase, na saída da máquina e separados por uma distância mínima de dois metros;
- **PDA,TGA:** Analisadores – faixa de 0,12 a 350 MHz (Medição na faixa de 40 a 350 MHz)
- **Bom:** 75% dos testes abaixo da magnitude
- **Mau:** Aproximadamente 10% dos testes acima da magnitude.

Os valores das Tabelas 3.2 e 3.3 estabelecem limites para que facilite diagnósticos de manutenção e que seja mais fácil manter critérios nas manutenções, no entanto a realidade dessas tabelas é que não condizem com a realidade encarada na Usina Hidrelétrica de Tucuruí, pois estes valores são extremamente baixos quando comparados com os valores obtidos nas máquinas da usina de Tucuruí.

Como já citado cada máquina possui suas devidas particularidades, e apesar de toda essa gama de testes realizados pela *IRIS POWER* esses valores não são aplicáveis a realidade da usina. Como referência para determinar se o enrolamento possui níveis altos de magnitude de descargas parciais, este valor é em torno de 3000 mV ou mais e para determinar que se deve realizar uma intervenção de manutenção na máquina estes níveis altos de descarga tem que estar presentes em cerca de 70% dos resultados obtidos.

Claro que se houver níveis muito altos em um determinado resultado obtido em comparação com os demais realizados naquela mesma máquina, provavelmente algo está ocorrendo no enrolamento e este possível problema deve ser investigado à cargo de se evitar possíveis danos ao enrolamento estatórico.

Esta realidade de valores extremamente mais altos que os estabelecidos pela empresa canadense se dá devido ao clima, umidade, aspectos construtivos da máquina, dentre outros fatores. E para estabelecer esses limites específicos para as máquinas da UHE de Tucuruí foi fundamentado empiricamente, devido a experiência dos colaboradores técnicos da empresa.

3.7. EFEITOS DA TEMPERATURA

Um estudo realizado por (Alvarestech,2011) evidenciou o fenômeno das descargas parciais causados por efeito da temperatura, um dos fatores seria a deterioração térmica o que acarreta em perda das capacidades mecânicas e elétricas da isolação do estator devido à operação estendida em altas temperaturas. Todo material utilizado na isolação e fixação com o tempo operando em temperaturas elevadas leva a deterioração do enrolamento. Claro que o tempo em que isso vai ocorrer dependerá das propriedades físicas e químicas de cada material, bem como as condições de operação a qual o equipamento é submetido pois tudo irá influenciar para que a deterioração que irá ocorrer esteja dentro de limites aceitáveis.

O sobreaquecimento tem a consequência de reduzir a vida útil da isolação, e este pode ter inúmeras causas, tais como operação em contínua sobrecarga, o que requer uma corrente maior passando pelo estator, o que conseqüentemente gera temperaturas mais altas. Outro ponto seria um sistema de refrigeração ineficiente, tais como bloqueios ou pontos não assistidos pela refrigeração, o que ocasiona aumento de temperatura também. A fonte deste tipo de problema as vezes é devido a falhas de projeto ou erros em processos de manutenção. Excessivos ciclos de partida e parada requerem altas correntes de partida, e volta-se ao fato de ocorrer temperaturas altas. Desbalanço de tensão pode ocasionar correntes de sequência negativa nos enrolamentos do estator, atuando efetivamente como aquecedores do circuito, e essas correntes serão dissipadas através da vibração, ruído e aquecimento. E o último seria o uso de variadores de frequência (PWM) que gera sinais de saída com largura de pulso modulado, ao invés de uma forma senoidal, e o conteúdo harmônico extra de tais sinais é convertido e dissipado em calor dentro do gerador/motor.

Há de se levar em conta os estresses aos quais a máquina e conseqüentemente seus enrolamentos são submetidos. Tais estresses podem ter caráter elétrico, mecânico, químico, eletromagnético, sujeira, etc. Quanto mais estresse, maior a taxa de deterioração.

Alguma das causas das falhas na isolação de máquinas girantes é o sobreaquecimento das bobinas, à medida que o sistema de isolação é exposto continuamente a esse sobreaquecimento, as resinas orgânicas tendem a perder sua rigidez mecânica, ocasionando um fenômeno conhecido como delaminação ou "desfolhamento" das camadas. Quando as camadas da isolação "desfolham", os condutores internos de cobre ficam livres para vibrar e então as descargas parciais aparecem nos vazios internos.

Os danos à isolação são cumulativos e não-reversíveis. Um dos sintomas mais fáceis de determinar o estresse térmico é através da inspeção visual, onde se verifica uma descoloração da isolação, que pode ser apreciado na Figura 3.13. A ruptura da isolação, considerando apenas a sobrecarga térmica, pode levar vários anos para acontecer e depende diretamente do gradiente de temperatura e espessura da isolação. Esse problema ocorre em menor quantidade em barras com isolação à base de resinas de epóxi ou aquelas refrigeradas à água, uma vez que esses tipos de montagens suportam melhor o estresse térmico.

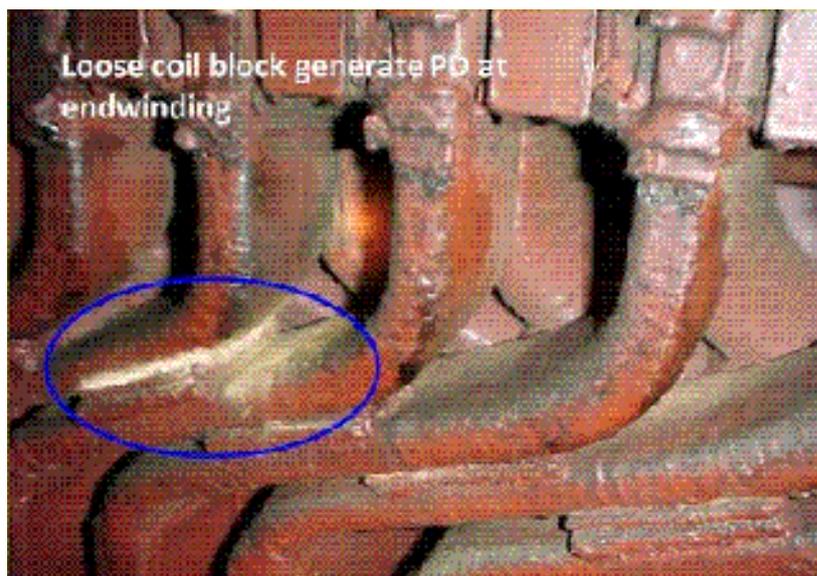


Figura 3.13 - Descarga Parcial em Enrolamento Estático
Fonte: Csanyi,2011

Pela lei de Arrhenius que permite calcular a variação da constante de velocidade de uma reação química com a temperatura, o que conseqüentemente implica em estabelecer a vida útil do sistema de isolação, a qual é exposta na equação 3.15 (Moderna Plus, 2013):

$$k = A * e^{-E_a/(R*T)} \quad (3.15)$$

Na qual :

- k = constante de velocidade;
- A = constante pré-exponencial (depende, dentre outros, da área de contato);
- E_a = Energia de ativação da reação (em kJ/mol, kcal/mol, ou outra unidade de energia por mol);

- R = constante universal dos gases;
- T = Temperatura na escala kelvin.

Em isolações mais antigas, os resultados podem ser delaminação, escoamento do material de amarração ou fixação e folga da isolação. Em isolações mais modernas encontra-se geralmente encolhimento e queima. Os sintomas costumam ser emissão de fumaça, descoloração e aparecimento das descargas parciais.

O ideal seria monitorar as atividades das descargas parciais nas máquinas rotativas para diagnosticar a deterioração da isolação do estator em geradores e motores. Vazios na isolação do estator, criados durante processo de fabricação ou pelo envelhecimento térmico e mecânico durante a operação que podem produzir Descargas Parciais durante estresse em alta tensão.

O desenvolvimento progressivo das atividades de descargas parciais é um sinal da deterioração da isolação em geradores e motores. Descargas parciais também contribuem para o envelhecimento do sistema dielétrico através da erosão gradual do sistema de isolação.

Falhas em grandes máquinas girantes causadas pela ruptura da isolação, ou curto-circuito, podem causar danos catastróficos e perdas muito caras. O teste de descargas parciais pode acessar a condição da isolação dos enrolamentos estatóricos e, portanto ajudar a estabelecer um programa de manutenção baseado nas condições da máquina. O monitoramento das condições e uma manutenção preditiva do isolamento estatórico trazem ao usuário os acréscimos de uma operação confiável, número ótimo de paradas para manutenção e tempo de vida máximo aos geradores e motores, demonstrado grande habilidade em detectar uma variedade de falhas nas condições da isolação dos barramentos estatóricos. (Alvarestech, 2011)

3.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A medição de descargas parciais em linhas de monitoramento vem cada vez mais se consolidando com um dos métodos mais eficazes de se avaliar a situação do enrolamento estatórico de máquinas rotativas, no caso em questão analisado, de hidrogeradores de grande porte.

Ao longo do capítulo apresentou-se conceitos básicos que envolvem o fenômeno, e mostrou-se os aspectos físicos, químicos e elétricos para que a compreensão do tipo de ocorrências e os padrões apresentados na literatura para uma unidade geradora ocorresse e estabeleceu-se os limites de magnitude aceitáveis de DP baseados na experiência técnica dos colaboradores da Eletrobras Eletronorte.

De posse destas informações observa-se que não apenas a geometria da máquina implica no aparecimento das descargas parciais, mas também a presença do fenômeno é

uma consequência de vários fatores como temperatura, umidade, método de isolamento, níveis de operação da máquina, envelhecimento, estresses elétricos, químicos ou físicos, etc. Todos estes contribuem para que a isolamento sofra e que propicie a degradação desta.

A medição das descargas parciais em hidrogeradores e o acompanhamento da evolução destas ao longo do tempo é crucial para avaliar a condição do enrolamento, pois o fenômeno normalmente tem um desenvolvimento lento, e caso apareça alguma anomalia como um aumento repentino dos níveis de DPs em determinado ponto do enrolamento um alerta é feito e uma possível intervenção será realizada.

Evidencia-se que em especial para geradores as descargas parciais têm uma caráter maior de alarme do que condenatório da isolamento do enrolamento do estator.

CAPÍTULO 04 - TÉCNICAS DE DETECÇÃO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Paradas ocasionadas por falhas, ou excesso delas, implicam em perda de confiabilidade na empresa, já que essas falhas acarretam em aumento na quantidade e custos de manutenção, o que em um mercado extremamente competitivo irá com certeza reduzir os lucros. Para tentar resolver esse problema, estudos com relação a máquinas rotativas foram intensificados e de acordo com estes uma das principais origens de falhas é no estator da máquina, mais especificadamente no setor de isolamento e viu-se que conjuntamente com essas falhas havia a ocorrência alta de descargas parciais. (Santos, 2011)

Na busca de se melhorar as linhas de monitoramento e manutenção deu-se uma atenção especial a investigação e monitoramento das descargas parciais no enrolamento estatórico do hidrogenador. O acompanhamento destas proporciona verificar a condição da isolamento elétrica do estator e se houver alguma adversidade pode-se programar uma intervenção na máquina antes que uma falha ocorra, proporcionando assim um segmento de manutenção preventiva, conjuntamente com o monitoramento das Descargas Parciais (DPs).

O ensaio de descargas parciais é um ensaio não destrutivo cuja finalidade é medir o nível de descargas parciais em um determinado equipamento numa dada tensão, onde existem diversos tipos de isolamentos envolvidos (sólido, líquido e gasoso). De maneira geral, o nível de descarga parcial medido deve estar abaixo de um valor prefixado por norma ou especificação do equipamento ensaiado. (Teixeira Jr, 2015)

No mercado há várias maneiras de se fazer a medição e detecção de descargas parciais, e basicamente as técnicas variam de elétricas a não elétricas. O método elétrico insere o circuito de captação no circuito onde ocorre as DPs e os métodos não elétricos dão apoio aos elétricos, estes podendo ser acústicos, ópticos, químicos, ultrassom, entre outros.

Essas outras técnicas foram desenvolvidas, pois as DPs podem produzir luminescência, pulsos de corrente, ondas acústicas, vibrações mecânicas, dentre outros sintomas. As diferentes maneiras de medição vão da necessidade de se capturar e reconhecer devidamente cada sinal de descarga parcial e proporcionar um diagnóstico mais preciso, e conseqüentemente uma intervenção mais adequada. (Cuenca,2005), (Faier, 2006)

No entanto algumas dificuldades para medições em máquinas síncronas ocorrem, pois neste o fenômeno não é facilmente constatável, pois trata-se de medições que registram oscilações em mV, estas normalmente bem baixas com relação a tensão ao qual o sistema opera, usualmente na faixa de kV.

Os circuitos e isolações de cada máquina tem suas particularidades, e mesmo que essas sejam de mesmo modelo e fabricante, seus isolamentos não podem ser considerados à parâmetros concentrados, conforme cita a norma IEC 60270.

Mesmo com o refinamento das técnicas aplicáveis na medição de descargas parciais ainda é inviável precisar o local que está ocorrendo o fenômeno e conseqüentemente fica inexequível determinar o nível de atenuação e distorção que os sinais sofrem ao longo do circuito do enrolamento estatórico. O que hoje é possível é delimitar uma área de maior probabilidade de ocorrência da DP ao longo do enrolamento do estator.

Ao se tratar do processamento digital o sinal de DP se apresenta em altas frequências e baixa energia, o que implica em técnicas diferenciadas para realizar a filtragem do sinal. Pela questão do ruído que pode se confundir ao sinal de descarga parcial em alguns momentos torna-se imprescindível a presença de um técnico para durante a medição averiguar se o sinal captado possui ruído e ajustar para que este seja atenuado e apenas o sinal de interesse seja apresentado. (Carvalho, 2014).

4.2. MÉTODOS NÃO-ELÉTRICOS

Os principais métodos não elétricos que se pode evidenciar são: (Cuenca,2005), (Faier, 2006)

- **Método óptico ou visual:** A detecção das descargas parciais é realizada observando-se as emissões de luz provocadas durante o fenômeno, estas são visualizadas em ambientes escurecidos no qual o observador pode utilizar binóculos de grande alcance ou ainda pode ser utilizado câmeras fotossensíveis que registram de forma ultra rápida, e ainda para se ter maior precisão dos registros, intensificadores de imagem podem ser utilizados.
- **Método químico:** Ocasiona a detecção de DPs em óleo ou equipamentos com isolante a gás, que é geralmente realizada analisando os produtos dissolvidos no óleo ou gás. Esses produtos vão se acumulando devido a operações prolongadas e esta análise química serve também para determinar o nível de degradação do isolamento, por exemplo de um transformador, devido às descargas parciais.
- **Método Acústico:** Detecta ondas ultrassônicas ou ruídos audíveis gerados pelas descargas parciais, ou seja, ruídos no ar ou em materiais próximos a fonte da DP. Este método implica em se utilizar sensores piezoelétricos ou transdutores, que podem ser acoplados na parte interna ou externa do equipamento. Obviamente deve ser realizado em um ambiente que possua níveis bem baixos de ruídos, para evitar maiores interferências. Várias técnicas são utilizadas como usar microfones ou transdutores conjuntamente com amplificadores, ou ainda utilizar sensores com alta sensibilidade para averiguar sons que estejam fora da zona humana audível. Usando

este método, técnicas bastante difundidas para localizar DPs em subestações isoladas à gás ou mesmo em transformadores são empregadas.

- **Método da tensão de rádio frequência (TRI):** Este é embasado no fato de que as descargas parciais produzem ondas eletromagnéticas na forma de interferência estática. O receptor é calibrado em microvolts para medir o valor de sinal de entrada e este irá captar as interferências provocadas pelas ondas eletromagnéticas. O método não é o dos mais aplicáveis para se localizar exatamente o segmento do equipamento que está ocorrendo a DP, mas é extremamente eficaz ao se quantizar o valor da ocorrência. A técnica é muito utilizada em equipamentos de alta tensão que ocasiona a detecção via a uma resistência, bem como em linhas de transmissão que por sua vez detecta a interferência em rádio frequência usando-se uma antena.

4.3. MÉTODOS ELÉTRICOS

Os métodos elétricos com certeza são os mais difundidos para realizar as medições e detecção das descargas parciais, e as normas IEC 60270 e IEEE P1434 procuram estabelecer padrões para que essas medições sejam as mais corretas possíveis, portanto fornecem várias alternativas de circuitos de ensaio. (Cuenca, 2005)

Neste método o circuito de medição torna-se parte integrante ao meio no qual está ocorrendo as descargas parciais, e basicamente este meio se comporta da mesma maneira que indutâncias com capacitâncias em paralelo ou capacitâncias aterradas. O circuito de medição pode ser modelado por uma impedância RLC (resistiva, indutiva, capacitiva) ou uma impedância RC (resistência capacitiva). (Faier, 2006)

Em suma há basicamente três circuitos de medição, e estes detectam uma queda de tensão em uma impedância de medição, provocada por impulsos de corrente em um circuito exterior. Estes três circuitos são divididos em dois segmentos: direto ou balanceado. (Nascimento *et. al*, 1990).

- a) Método Direto:** Os instrumentos de medição são diretamente ligados a uma impedância (Z_m) em série com o objeto sob ensaio (C_t) ou em série com um capacitor padrão (C) livre de descargas parciais na tensão de ensaio, e Z é um filtro passa baixa que bloqueia os ruídos de alta frequência provenientes da rede. Estes dois tipos de circuito são apresentados respectivamente na Figura 4.1a e Figura 4.1b. (Nascimento *et. al*, 1990). O primeiro circuito é mais utilizado em casos que o objeto de ensaio tem uma extremidade aterrada, e neste tipo de configuração de circuito há uma proteção maior do equipamento de medição de falhas que vem do objeto de ensaio, já o segundo circuito é mais propício a ser utilizado para quando o lado de baixa tensão do objeto sob ensaio é isolado do referencial da terra. Frisa-se que estes são de mais fácil implementação, no entanto mais suscetíveis a ter interferências. (Faier, 2006).

b) Método Balanceado: Neste a montagem do circuito é realizado em ponte. A principal vantagem é a redução de interferência nos instrumentos de medição, pois o circuito é balanceado antes do ensaio, o que implica em rejeição de ruído em modo comum. Há a utilização de duas impedâncias variáveis de medição (ver Figura 4.2).

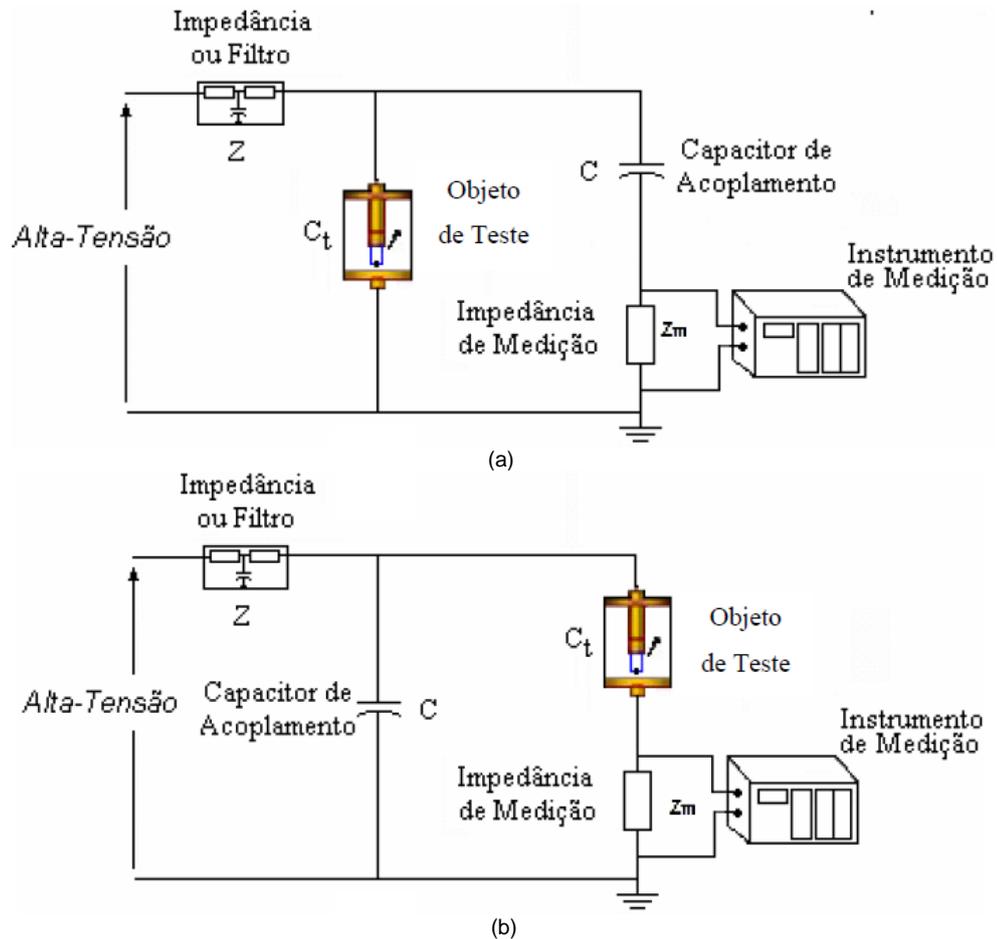


Figura 4.1 - Configurações Sugeridas Pelas Normas para a Detecção e Medição de Descargas Parciais no Método Direto. Objeto de Teste com: (a) Extremidade Aterrada, (b) Isolado da Terra
 Fonte: Faier, 2006, pg. 11

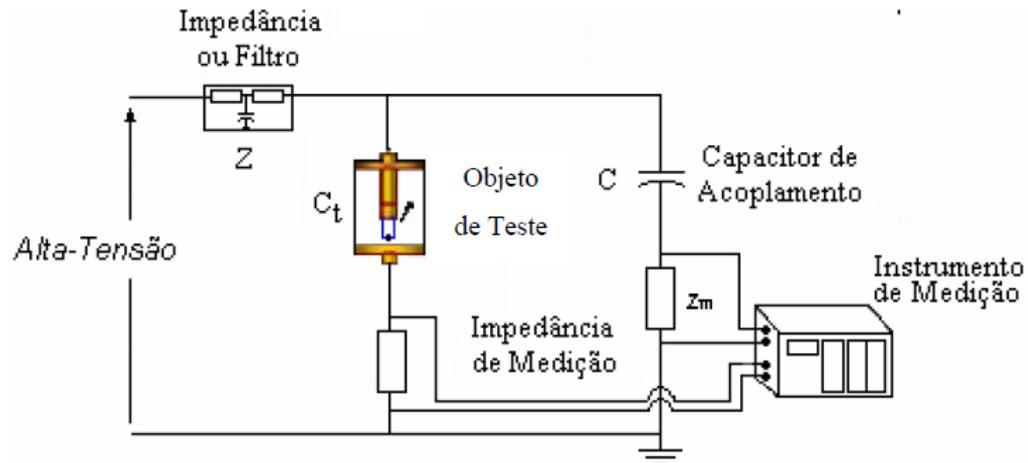


Figura 4.2 - Configurações Sugeridas Pelas Normas para a Detecção e Medição de Descargas Parciais no Método Balanceado. Objeto de Teste Isolado da Terra e Configurado para Haver Menos Interferência Externa
 Fonte: Faier, 2006, pg.11

4.4. FORMA DOS PULSOS NA IMPEDÂNCIA DE MEDIÇÃO

São utilizados geralmente dois tipos de impedância de medição: o circuito RC e o circuito oscilatório RLC. Os pulsos que surgem através dessas impedâncias podem ser calculados usando as transformadas de Laplace. (Campos,1983)

4.4.1. Circuito RC

Neste circuito o pulso de tensão é unidirecional, que é exibido na Figura 4.3, e é dado pela equação 4.1.

$$V = \frac{q}{\left(1 + \frac{c}{K}\right) * a + c} * e^{-t/(R*m)} \quad (4.1)$$

Na qual:

q - é a intensidade da carga aparente causadora do impulso, $q = b * \Delta V$;

a - é a capacitância da amostra afetada pelas descargas;

c - é a capacitância da impedância de medição;

K - é a capacitância do capacitor de acoplamento;

t - é o tempo;

R - é a resistência;

L - é a indutância;

m - é dado por: $m = \frac{a*K}{a+K} + c$.

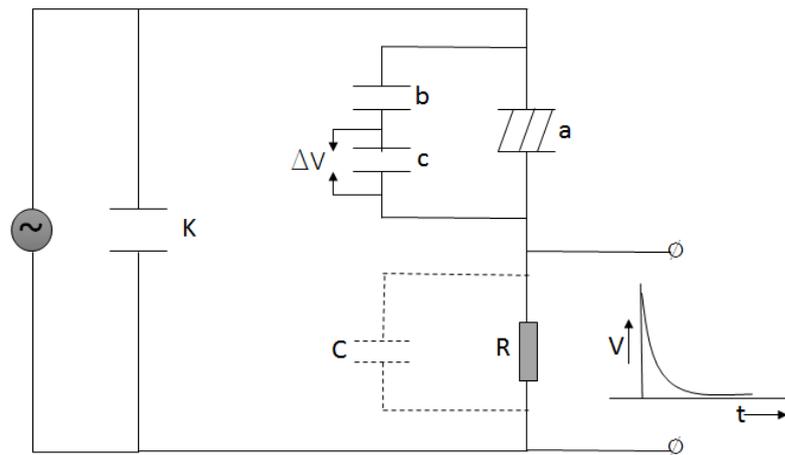


Figura 4.3 - Resposta com Circuito RC
Adaptado: Campos, 1983, pg.09

4.4.2. Circuito RLC

No circuito RLC, o qual é apresentado na Figura 4.4, o pulso de tensão é uma oscilação atenuada com o mesmo valor de crista da tensão que com um circuito RC, sendo exposto na equação 4.2 e 4.3, e os termos da equação possuem mesmo significado dos expostos no tópico anterior.

$$V = \frac{q}{\left(1 + \frac{c}{K}\right) + a + c} * e^{-\left(\frac{t}{2 * R * m}\right) * \cos(\omega t)} \quad (4.2)$$

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{L * m} - \frac{1}{4 * R^2 * m^2}\right)} \quad (4.3)$$

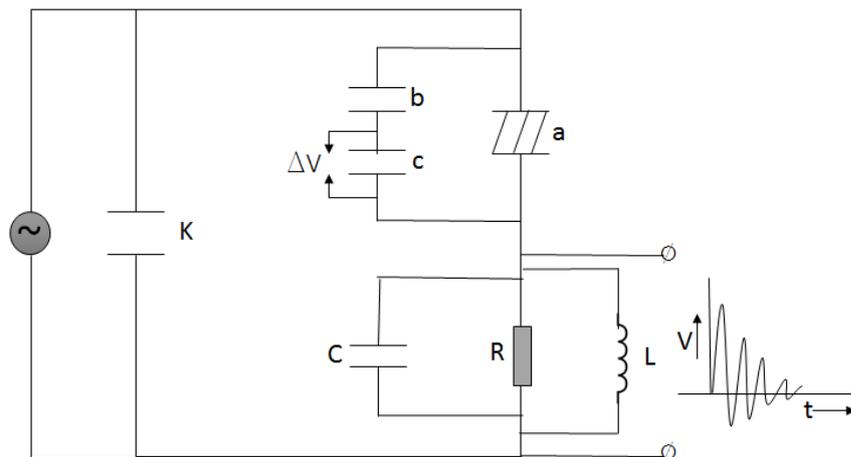


Figura 4.4 - Resposta com Circuito RLC
Adaptado: Campos, 1983, pg.10

Evidencia-se que a amplitude do pulso de tensão é proporcional à carga aparente de descarga, o que independe de R. Mas se a resistência for baixa, a constante de tempo R*m será pequena e o pulso agudo; isto implica que nem sempre os amplificadores amplificarão

completamente e o pulso resultante torna-se menor se R for reduzida. Tais deduções se aplicam as equações 4.1 e 4.2. (Campos, 1983)

4.5. ESPECTRO DE FREQUÊNCIA (ESCOLHA DO AMPLIFICADOR)

4.5.1. Após um Circuito RC

Os pulsos unipolares produzidos sobre este tipo de impedância de medição tem um espectro de frequência que é aproximadamente constante em amplitude até uma frequência $f_1 = \frac{1}{(2*\pi*R*m)}$; evidencia-se que m depende das constantes a , K e c , e a extensão do espectro de frequência depende do circuito e do valor do resistor R .

O amplificador usado para amplificação desses pulsos deveria apresentar uma largura de banda maior ou igual a f_1 . Há casos que se utiliza um amplificador de banda estreita com frequência de banda média inferior a f_1 , que é exibido na Figura 4.5, e a amplitude do sinal obtido é proporcional ao do sinal original. (Campos, 1983)

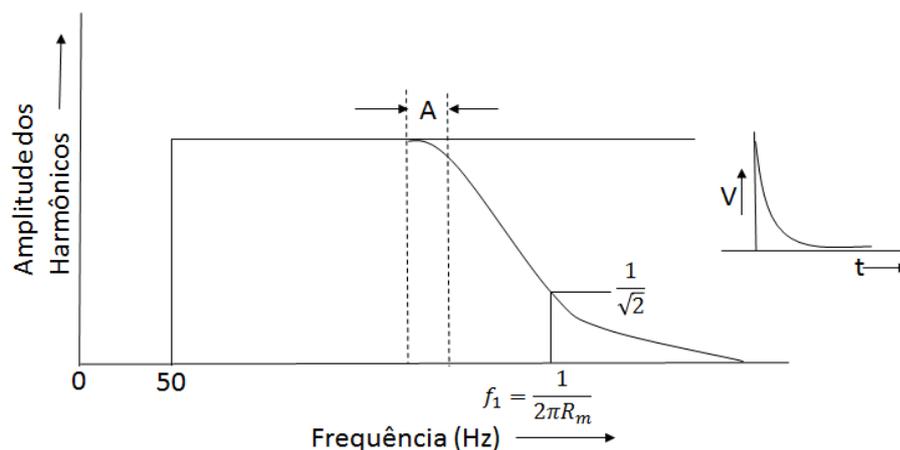


Figura 4.5 - Espectro de Frequência de Pulsos Unidirecionais (Circuito RC)
Adaptado: Campos, 1983, pg.11

4.5.2. Após Um Circuito RLC

Os pulsos oscilatórios produzidos no circuito RLC tem um espectro de frequência, de modo semelhante ao exibido na Figura 4.6, no qual a frequência de banda média w é determinada pela impedância RLC quanto pelas constantes do circuito. A largura de banda do amplificador após um circuito RLC tem que ser igual ou maior que o do sinal para que assim se propicie uma sensibilidade maior. (Campos, 1983)

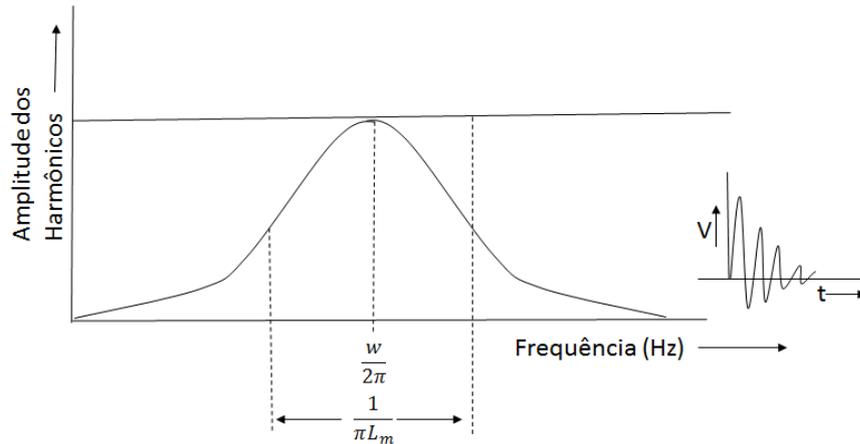


Figura 4.6 - Espectro de Frequência de Pulsos Oscilatórios (Circuito RLC)
Adaptado: Campos, 1983, pg.11

4.6. MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

4.6.1. Características dos Circuitos de Medição

Quando acontece o fenômeno das descargas parciais em um equipamento elétrico este ocorre na forma de um trem de pulsos de corrente de alta frequência, da ordem de kHz até GHz, superpostos à tensão a qual é submetida o equipamento. Na Figura 4.7 se exibe um pulso elétrico de uma DP no isolamento de uma barra estática de um gerador, que foi registrada durante um ciclo da rede.

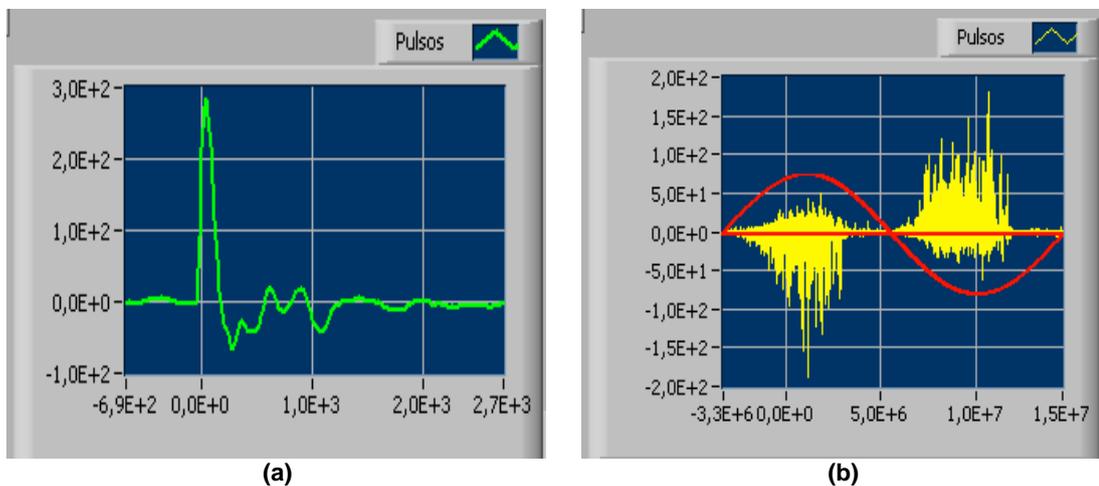


Figura 4.7 - (a) Pulso de DP; (b) Trem de Pulsos ao Longo de um Ciclo Senoidal.
Fonte: Amorim *et. al*, 2009, pg.02

Os sinais de descargas parciais são medidos a partir de capacitores de acoplamento conectados em pontos pré-estabelecidos ao longo dos circuitos das fases, no caso de enrolamentos estáticos. Dependendo da máquina e a forma de medição escolhida o número de acopladores instalado por circuito e a fase podem variar; no caso de enrolamentos estáticos não há uma regra exata para se estabelecer esses números, isto é

devido que independente do critério a ser adotado na maioria das vezes precisar a localização no estator e quantizar o nível da magnitude das descargas parciais não é trivial.

Quando se analisa o enrolamento do estator em altas frequências este se comporta como um grande circuito distribuído, de modo semelhante a uma linha de transmissão, por exemplo. Ocasionalmente as DPs irão apresentar magnitudes distintas, isso porque irá depender do local de ocorrências destas e da posição em que se encontra o acoplador que está captando este sinal.

Portanto esta medição deve ter caráter estatístico, ou seja, deve-se acompanhar a evolução destas descargas ao longo do tempo e realizar possíveis projeções das condições do enrolamento como um todo. Não se analisa apenas as magnitudes, mas também o tipo de ocorrência que está acontecendo ao enrolamento. (Amorim *et. al*, 2009)

4.6.2. Variáveis do Circuito de Medição

O circuito de medição possui algumas peculiaridades importantes para uma medição o mais confiável e correta possível: (Amorim *et. al*, 2009)

- Sinal de referência de tensão para sincronismo;
- Capacitor de acoplamento;
- Fonte de alta tensão externa (quando a medição for off-line);
- Impedância de medição;
- Distância física do equipamento sob teste;
- Filtros analógicos;
- Frequência de medição;
- Aterramento;
- Calibração.

4.6.2.1. Sinal de Referência de Tensão

Para que a medição ocorra deve se ter um referencial de tensão que irá ser aplicada ao objeto na frequência nominal. A referência pode vir de divisores de tensão ou de um transformador de potencial conectado ao equipamento, ou ainda este sinal pode ser requisitado de uma fonte de 110V ou 220V da própria fonte de alimentação do sistema de medição. (Amorim *et. al*, 2009)

4.6.2.2. Capacitor de Acoplamento

O sinal de DP pode ser capturado através de acopladores capacitivos, os quais tem a função de transferir o espectro de alta frequência dos sinais de descargas parciais do enrolamento estático até o dispositivo de acoplamento e também atenua a tensão do

sistema para baixas magnitudes (Brasil, 2013). Estes capacitores formam um caminho preferencial para correntes de frequência mais elevadas. A escolha do capacitor depende da capacitância do objeto analisado e a faixa de frequência na qual se irá trabalhar. O capacitor funciona como um filtro passa alta ao ser conectado ao enrolamento estático e a uma terminação resistiva, podendo esta ser de 500, 1000 ou ainda 1500 m Ω .

Os capacitores mais comumente encontrados no mercado para este fim são de 80 pF, 145 pF, 220 pF, 500 pF ou mais. O mais comum utilizado no Brasil é o de 80 pF com resistência de 680 Ohms. Nesta configuração a frequência de corte é em torno de 2,8 MHz, implicando que sinais abaixo desta frequência serão atenuados, o que pode implicar em perdas de sinais de descargas parciais.

Geralmente o número de acopladores que serão instalados está diretamente ligado a dimensão física da máquina, pois sinais de alta frequência se atenuam muito em enrolamentos estáticos; portanto caso se deseje ampliar a área analisada, mais acopladores serão necessários. A Figura 4.8 mostra os dois tipos de acoplamento possíveis, sendo um no interior do enrolamento e o outro na saída de fase. (Amorim *et. al*, 2009)

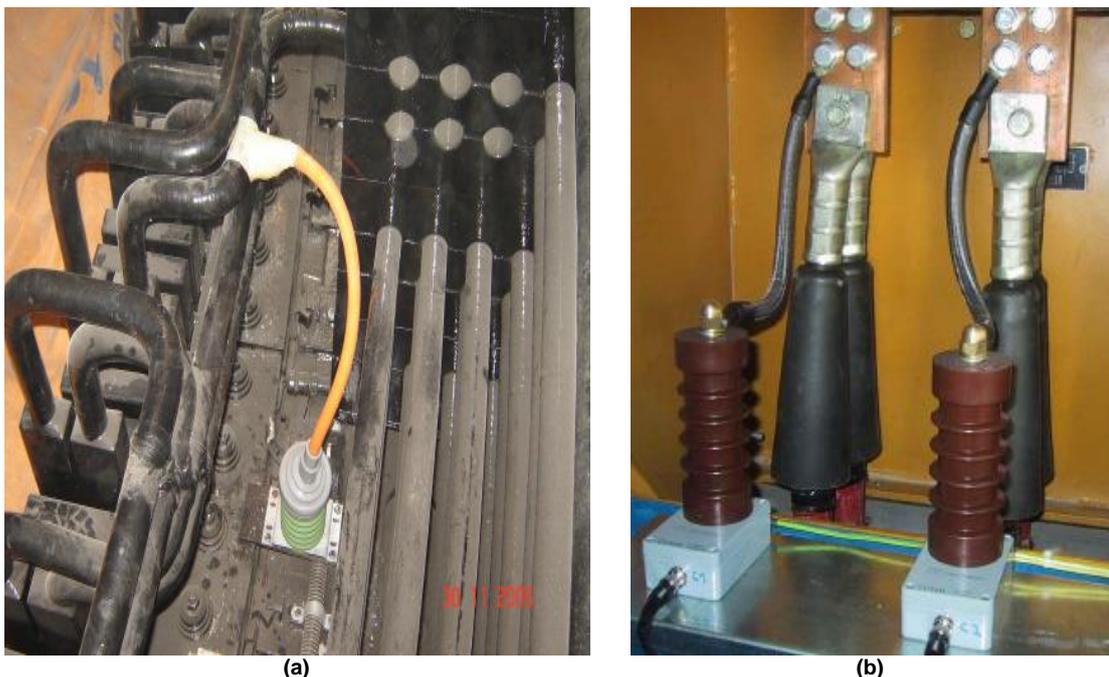


Figura 4.8 - Acopladores Capacitivos Instalados: (a)Interior do Enrolamento; (b)Saída de Fase
Fonte: Amorim *et. al*, 2009, pg. 04

4.6.2.3. Fonte de Tensão Externa (Quando a Medição for Off-Line)

Quando a medição for realizada com a máquina estando desligada do sistema elétrico, uma fonte externa de tensão torna-se necessária para que o enrolamento seja alimentado. Para se determinar a potência da fonte a ser escolhida verifica-se a tensão da máquina e as

capacitâncias do seu enrolamento; tendo esses valores em mãos será possível estabelecer a potência ideal para a fonte. (Amorim *et. al*, 2009)

4.6.2.4. Impedância de Medição

A impedância de medição pode ter o caráter de uma resistência de valor comercial até um circuito mais complexo envolvendo capacitores, indutores e resistores, possuindo a função de capturar os sinais de DPs e prover o sinal de referência de tensão na frequência nominal. Basicamente o objetivo é se relacionar o parâmetro a sua característica em frequência. Um exemplo desta impedância é apresentado na Figura 4.9. (Amorim *et. al*, 2009)

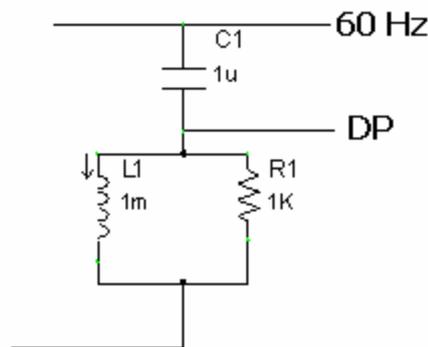


Figura 4.9 - Impedância de Medição de Descargas Parciais
Fonte: Amorim *et. al*, 2009, pg.05

4.6.2.5. Distância Física do Equipamento sob Teste

A atenuação do sinal é um problema que deve ser contornado, portanto deve ser estudado e comedido, à cargo de se aumentar a confiabilidade da medição. Nas medições em campo normalmente utilizam-se cabos coaxiais, estes por sua vez também produzem mais atenuação, portanto o software utilizado na aquisição tem como uma das funções tentar contornar isso, utilizando o sistema de ganho do sinal, por exemplo. (Amorim *et. al*, 2009)

4.6.2.6. Frequência de Medição

De acordo com a instalação é possível ajustar as faixas de frequência mais sensíveis para cada enrolamento, ou ainda para cada acoplador específico. As frequências que se estabelecem para as medições deve seguir uma norma no qual as medições subsequentes possam ser comparadas.

As medições em campo podem sofrer interferências, devido a ruídos, por exemplo, estes podem tender a apresentar a mesma faixa de frequência estabelecida pela norma, e para que a medição não seja anulada, deve-se averiguar os sinais ruidosos na instalação a cargo de se expurgar ou atenuar esses ruídos. (Amorim *et. al*, 2009)

4.6.2.7. Supressão de Ruídos

Ruídos impedem a eficiência da medição de descargas parciais, estes podem ser de diferentes tipos, o que implica em apresentarem formas, amplitudes e características diferentes em cada instalação. Há diversas técnicas que os eliminam ou os atenuam, sendo uma destas técnicas o emprego de filtros analógicos.

Vários tipos de filtros podem ser realizados e implementados, e utilizados em cada caso específico; é importante apontar ainda os filtros digitais, o uso do sinal de ruído para *trigger* o sinal real, chamado *gating*, podem ser usados também. (Amorim *et. al*, 2009)

4.6.2.8. Aterramento

A avaliação visual do local a ser realizado o ensaio, assim como um possível levantamento dos pontos de terra existentes, são de alta importância no instante de montagem do circuito de ensaio e medição. Se usar chapas de cobre em vez de fios, minimiza o efeito indutivo, e ainda a eliminação de pontas que possam acarretar o surgimento de corona deve ser realizado antes do início do ensaio, desta forma blindando partes que possam gerar ruídos. (Amorim *et. al*, 2009)

4.6.2.9. Calibração

Calibrando-se o equipamento é possível saber-se quais as amplitudes reais do sinal, nela os pulsos de corrente são gerados por um calibrador que é um gerador de pulsos retangulares de tensão de amplitude U_0 em série com um capacitor C_0 ocasionando que as cargas sejam repetitivas em uma amplitude determinada.

$$q_0 = U_0 * C_0 \quad (4.4)$$

O circuito de calibração é exibido na Figura 4.10, o calibrador deve ser retirado do circuito antes da aplicação da tensão de ensaio. O calibrador deve possuir um fator de escala k linear, tempo de resolução do pulso T_r variável sob ajuste e uma taxa de repetição N ajustável para que possa ser verificado pelo sistema de medição. Ele deve ser capaz de gerar pulsos positivos e negativos e operado por bateria. (Amorim *et. al*, 2009)

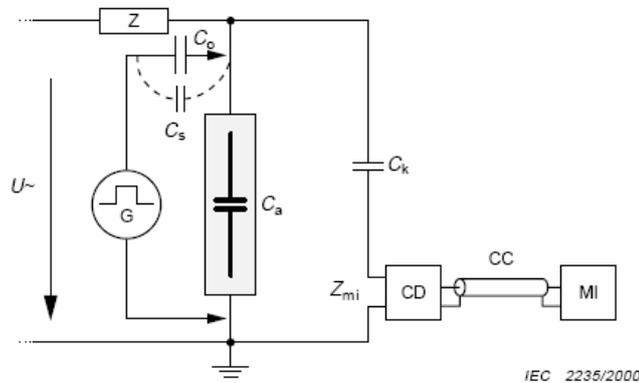


Figura 4.10- Circuito de Calibração e o Calibrador Instalado nos Terminais da Máquina
 Fonte: Amorim *et. al*, 2009, pg.07

4.6.3. Sistema Aplicável a Hidrogeradores

O sistema de medição de descargas parciais desenvolvida pela *Ontario Hydro*, atual *IRIS POWER*, consiste em suma do uso de um medidor de descargas parciais (discriminador de pulsos microprocessado), de acopladores capacitivos (capacitores de alta tensão ligados aos circuitos de fase do gerador), de cabos coaxiais para transmissão dos pulsos via caixa de interligação até o medidor PDA (*Partial Discharge Analyser*); frisa-se que maiores detalhes acerca do PDA será abordado no capítulo seguinte.

O princípio de funcionamento do sistema de medição consiste em que os pulsos provenientes do sistema são captados por acopladores capacitivos C_1 e C_2 , transmitidos ao medidor PDA para tratamento e impressão de dados; este esquema é exibido na Figura 4.11. (Nascimento *et. al*, 1990)

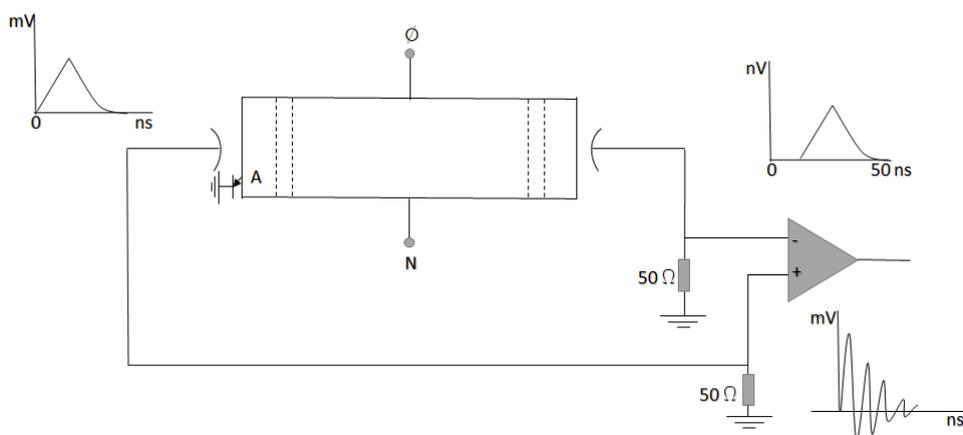


Figura 4.11 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Medição
 Adaptado: Nascimento *et. al*, 1990, pg.19

Ao se tratar de ruídos provenientes do sistema que são oriundos de pulsos na excitatriz estática, descargas em escovas do sistema de medição, sinais de RF conduzidos ao gerador, estes são eliminados utilizando-se um sistema de rejeição em modo comum, tal como exibido na Figura 4.12, através do balanceamento do circuito elétrico compreendido desde os acopladores capacitivos até o analisador de DPs do sistema de medição, de modo que os pulsos vindos de C_1 e C_2 cheguem simultaneamente ao amplificador diferencial do analisador.

Pelo fato de os pulsos chegarem com a mesma intensidade e polaridade, a sua diferença será zero e, não haverá sinal a ser tratado pelo medidor.

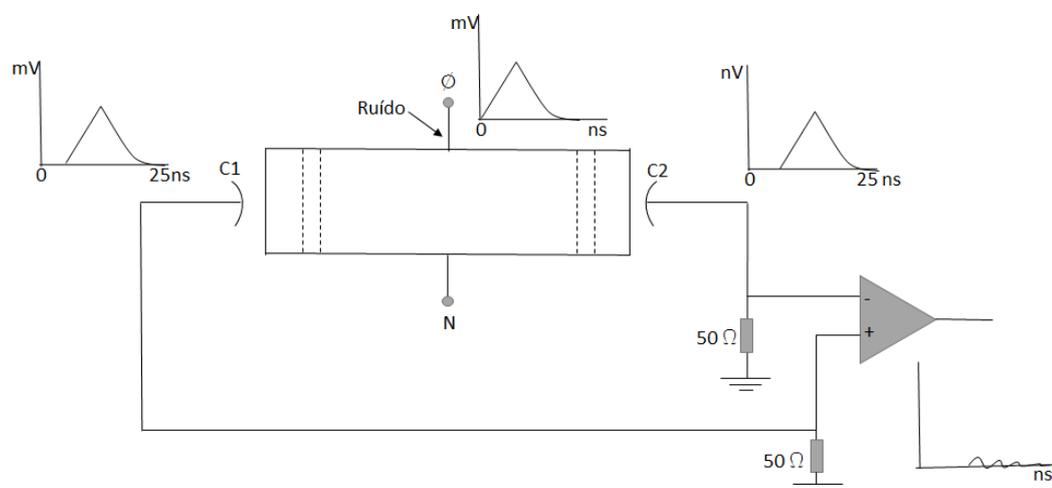


Figura 4.12 - Sistema de Rejeição em Modo Comum
Adaptado: Nascimento *et. al*, 1990, pg.20

Os pulsos de descargas parciais (com tempo de subida em torno de 5 ns e duração de 0,5 a 5 μ s) acontecendo em um ponto "A" do sistema de isolamento das barras estatóricas do gerador, tal como exibido na Figura 4.12, também são transmitidos ao sistema de medição via C_1 e C_2 , porém, pelo fato da proximidade da falha "A" com C_1 ocasionará que o sinal que passa por este acoplador chegue mais rápido ao analisador, fazendo com que a diferenciação seja diferente de zero e o sinal será amplificado e será classificado segundo a polaridade do pulso, sua amplitude e frequência de ocorrência.

Os pulsos de DP (positivos e negativos) no PDA são impressos em papel do tipo semi-log, tal como exibido na Figura 4.13, e o diagnóstico é dado pelo tipo de isolamento e pelo nível dos pulsos versus a taxa de repetição destes. Geralmente uma mudança da curva para a direita é indicativo de aumento no nível de descargas parciais.

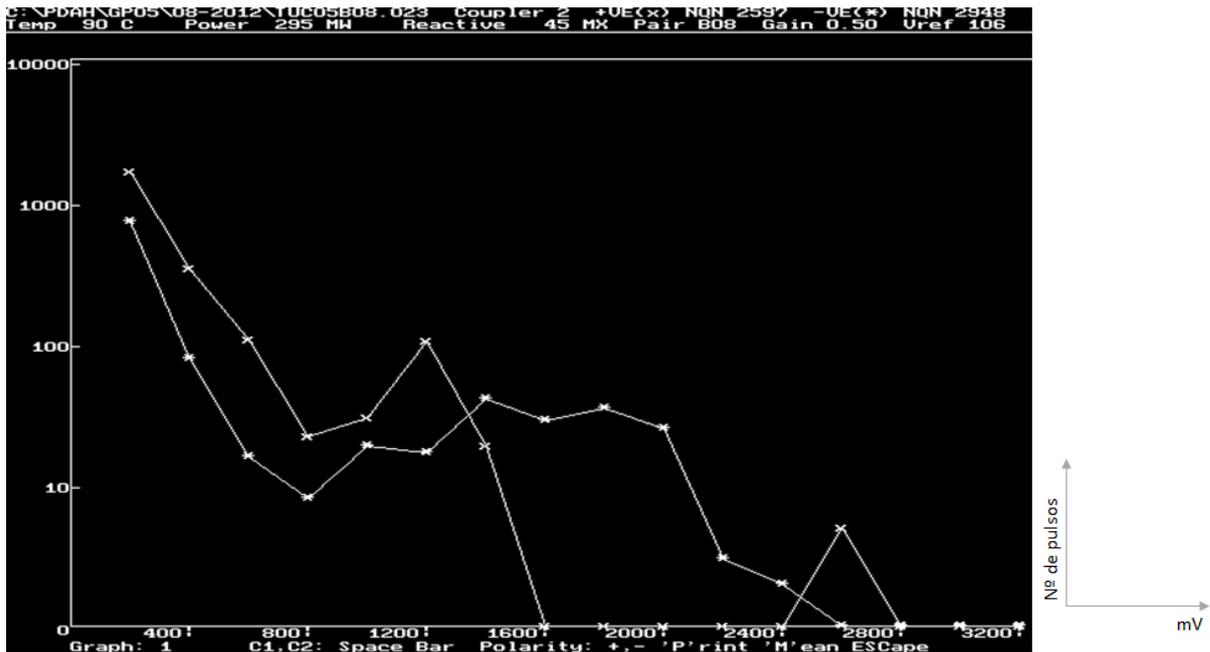


Figura 4.13 - Resultado de Teste pelo PDA em um Acoplador de um Hidrogerador da UHE de Tucuruí

O teste de DP pode ser efetuado a qualquer instante com a máquina em operação normal, e para tal basta conectar o PDA à unidade geradora através de um conector tipo *plug-in* existente na caixa de interligação do medidor com o conjunto formado por enrolamento/acoplador/cabo coaxial (Nascimento *et.al*, 1990).

4.6.4. Tipos de Instalação dos Acopladores

É crucial se manter um nível de excelência na qualidade dos acopladores, bem como na sua instalação e o balanceamento elétrico do conjunto.

Basicamente há dois tipos de métodos de instalação dos acopladores capacitivos que são:

- **Acopladores diferenciais:** Instalados no enrolamento do estator ou no anel do circuito de fase do gerador hidráulico;
- **Acopladores direcionais:** Instalados na saída de fase do gerador.

O esquema elétrico para ambos os tipos de instalação são apresentados na Figura 4.14. A técnica consiste em que, o comprimento do meio de transmissão do sinal, representados por X e R , desde o ponto de conexão da barra de saída da fase ou propriamente, desta até o medidor, deve ser igual pelos dois caminhos (via C_1 ou C_2). O valor é dado pela equação 4.5.

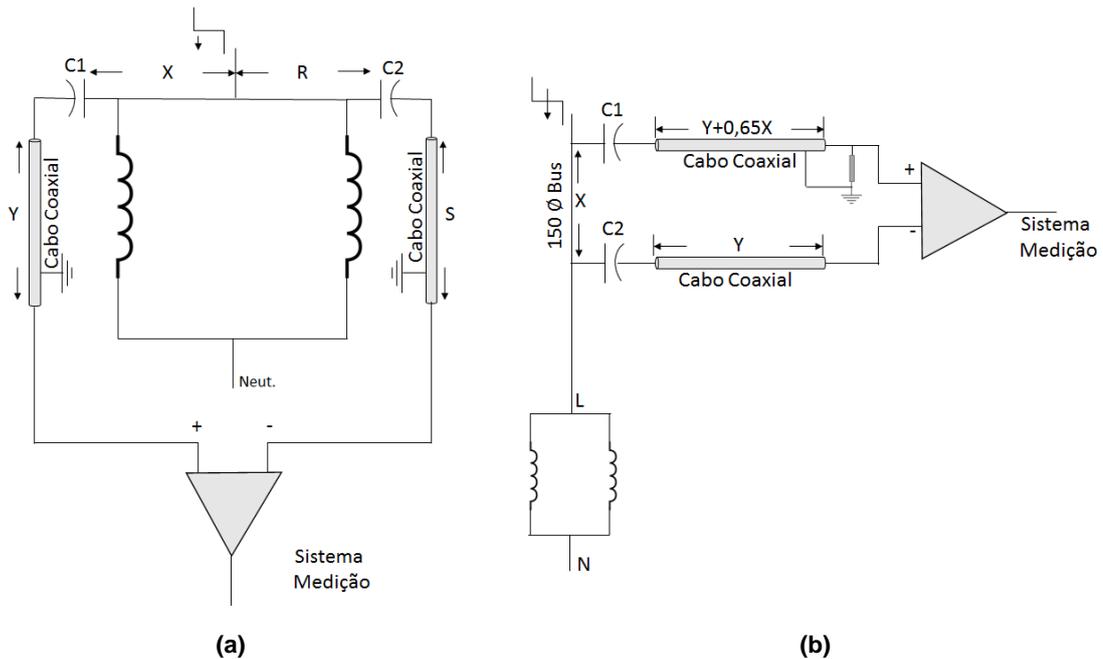


Figura 4.14 - Diagramas Elétricos: (a) Acopladores Diferenciais; (b) Acopladores Direcionais
Adaptado: Nascimento *et. al*, 1990, pg. 22-23

$$X + \frac{Y}{0,65} = R + \frac{S}{0,65} \quad (4.5)$$

O fator 0,65 é utilizado devido a velocidade da propagação dos pulsos no cabo coaxial que correspondem a 65% do valor do anel de fase, e o tipo de acoplador a ser utilizado dependerá da máquina e de suas características próprias.

Os acopladores capacitivos usados são fabricados com cabos de alta tensão tipo XPLE (polietileno reticulado e cobertura de PVC), cuja classe de tensão depende da tensão de linha do gerador; os novos tipos de acopladores são mais compactos, feitos com folhas de mica, encapsulados em um composto de epóxi formulado para este fim.

No caso de tensão 13,8 kV, usa-se usualmente cabo classe 28 kV que, após preparado, tem uma capacitância de 80 pF. O mínimo de 6 acopladores por gerador são necessários (2 por fase), para o método diferencial de medição. Um gerador como os utilizados na UHE de Tucuruí, que possui 8 circuitos paralelos por fase, pode ter instalado até 24 acopladores capacitivos, ou seja, 8 por fase, monitorando assim todos os circuitos. (Nascimento *et.al*,1990)

4.7. MAPAS ESTATÍSTICOS E HISTOGRAMAS DE AMPLITUDES

Um dos métodos mais comuns de se identificar as descargas parciais é associando os resultados obtidos à sua fase correspondente e analisando em que pontos de concentração há descarga parcial, e através dos resultados obtidos compará-los a norma e se identificar o que ocorre ao equipamento, vários instrumentos de medição utilizam este método para

obtenção de resultados e este acaba por ser também um dos mais eficazes na interpretação dos sinais.

De acordo com (Brasil, 2013) na análise de associação à fase inicialmente supõe-se que a tensão de ensaio ou sistema é constante e os ângulos de fase desta onda são discretizados em faixas. O instrumento de medição de DPs mede a amplitudes da carga aparente (q), relacionadas ao ângulo de fase (φ_i) da tensão de ensaio ou do sistema, durante certo intervalo de tempo. Durante esse intervalo de tempo, os valores das amplitudes são acumulados e podem ser expressos pela razão da taxa de ocorrência (n), esses dados de DPs são classificados como mapas estatísticos das DPs. Os softwares de análise exibem essas informações como distribuições bivariadas, do tipo (φ_i, q, n) , como exemplificado na Figura 4.15. Esta figura foi retirada de um exemplo de uma medição realizada com o programa IMA-DP, este que melhor será abordado e explicado nos capítulos subsequentes.

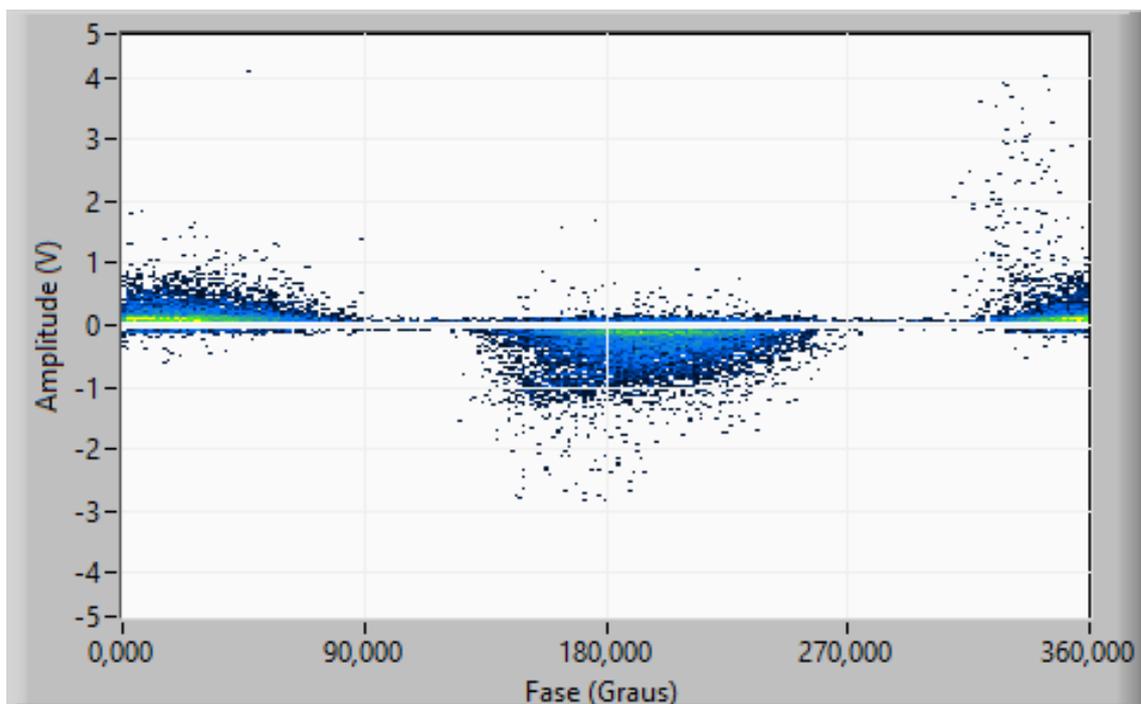
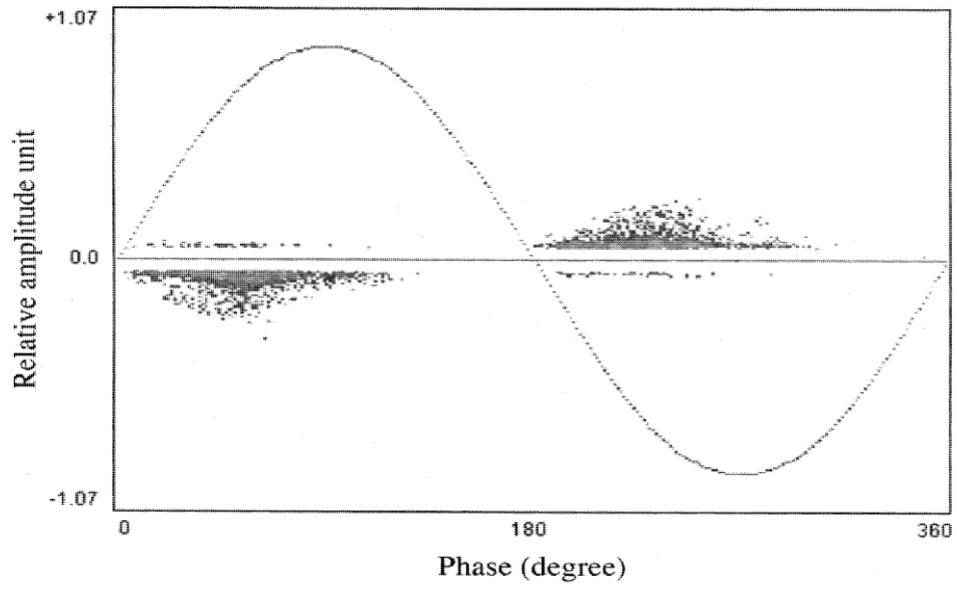


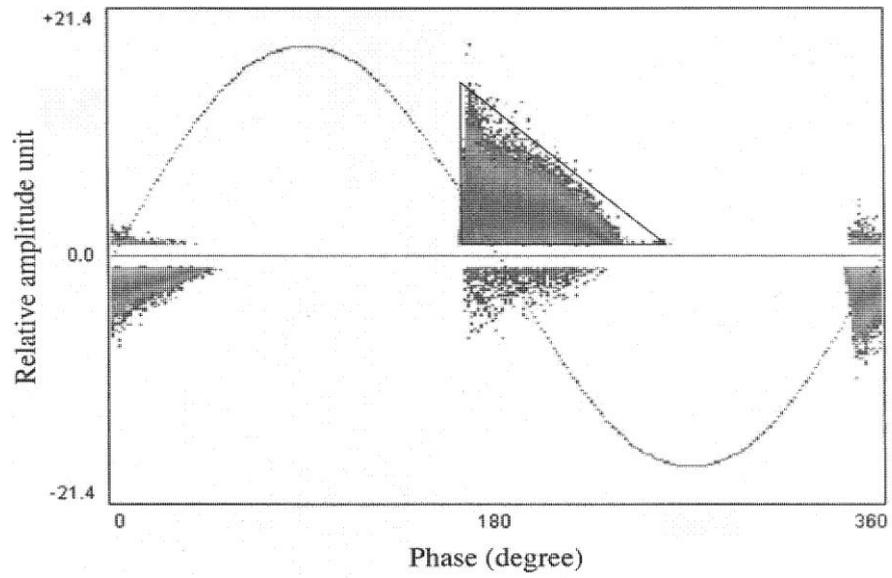
Figura 4.15 - Mapa Estatístico-Caso Real

Baseando-se pela revisão de literatura e principalmente através da fonte (Hudon *et. al*, 2005) na Figura 4.16 é possível averiguar alguns tipos de descargas parciais e como pode ser realizada sua correlação com os mapas estatísticos gerados pelos equipamentos tecnológicos de medição, ou seja, estabelecer os padrões das DPs.

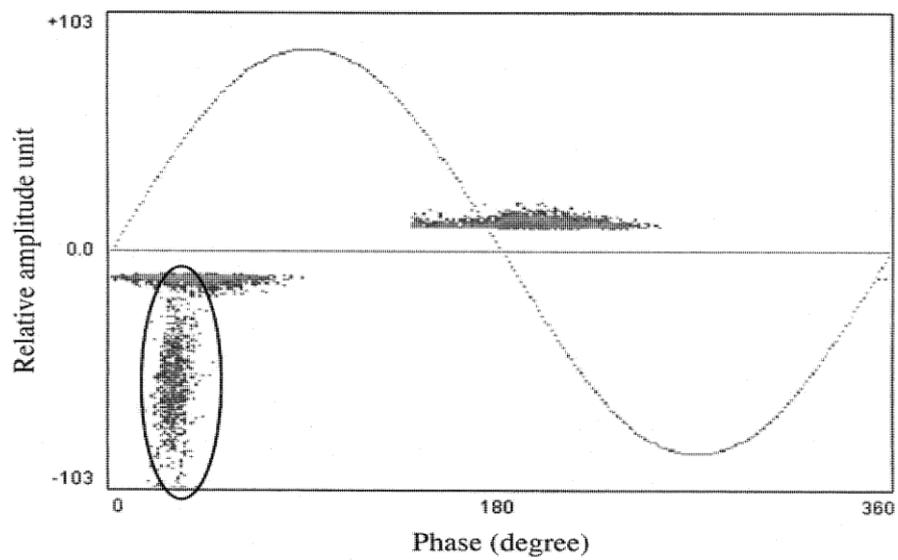
Descargas Internas



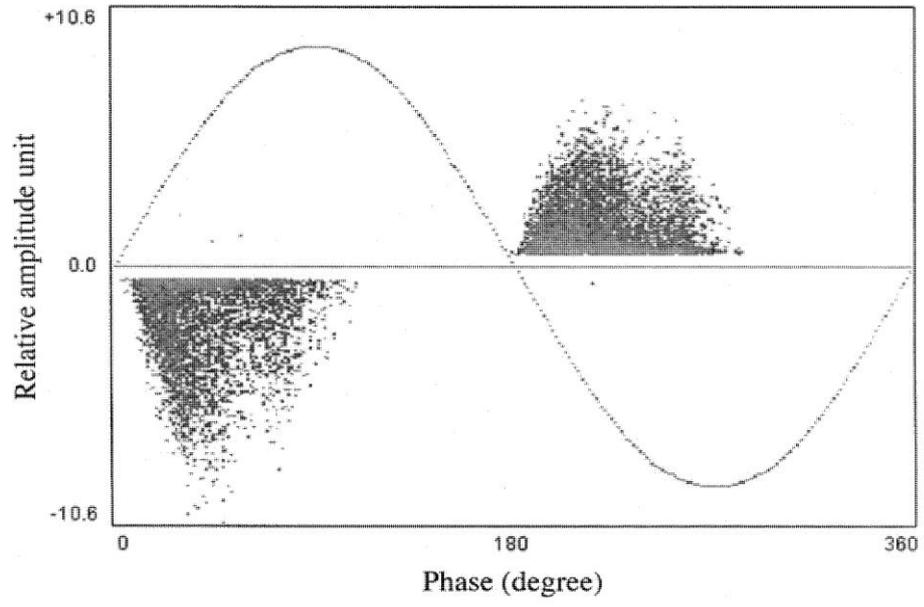
Descargas de Ranhura

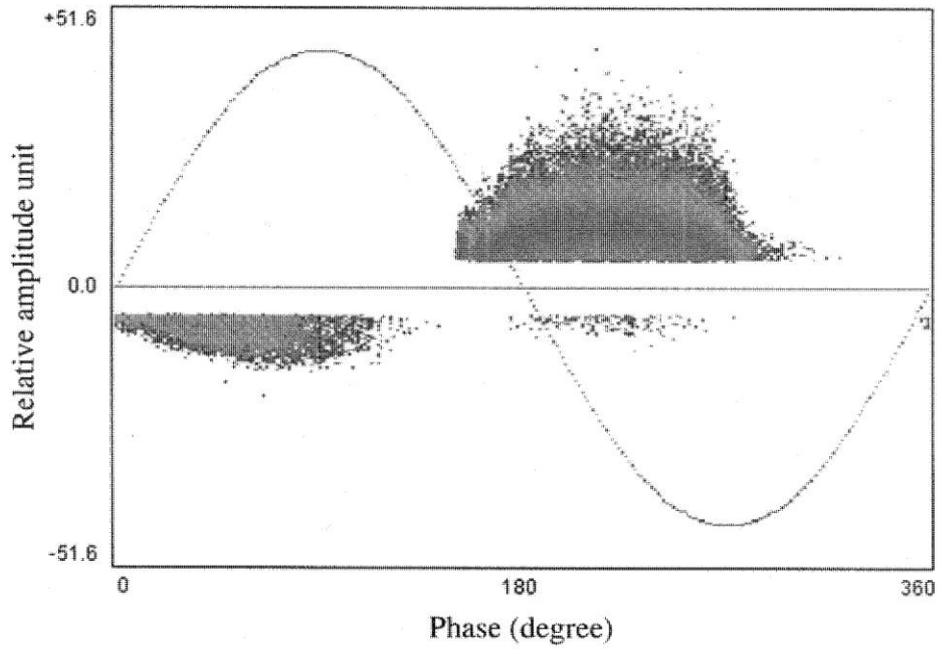


Descargas de Superficie

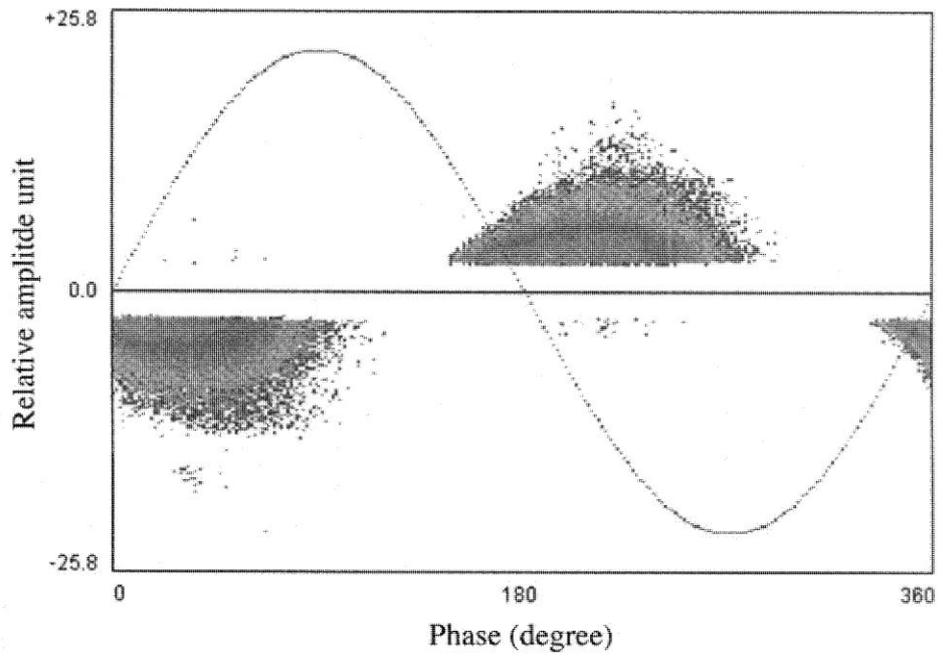


Delaminação





Corona



Descarga tipo Gap entre barras e entre a barra e o dedo de pressão do núcleo

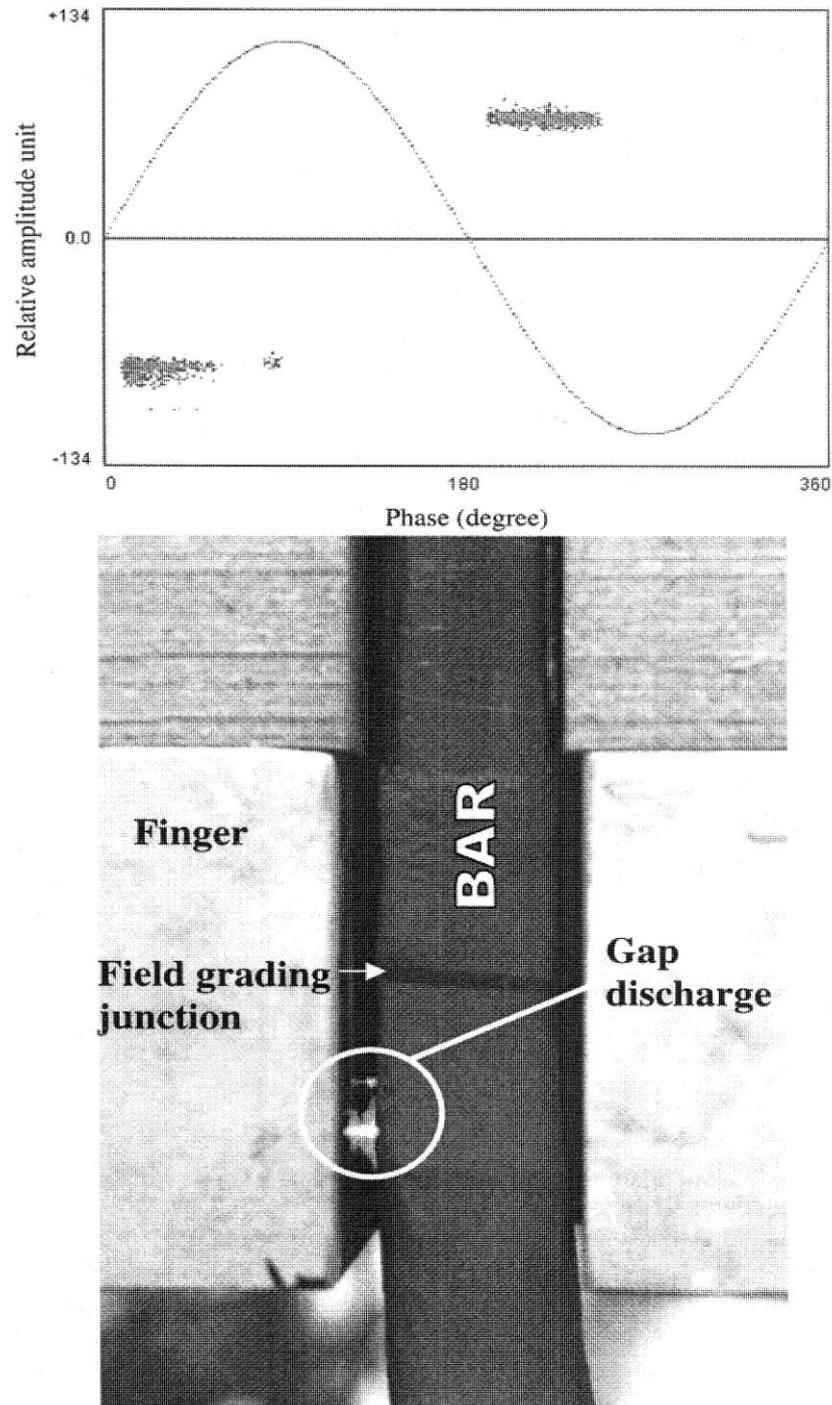
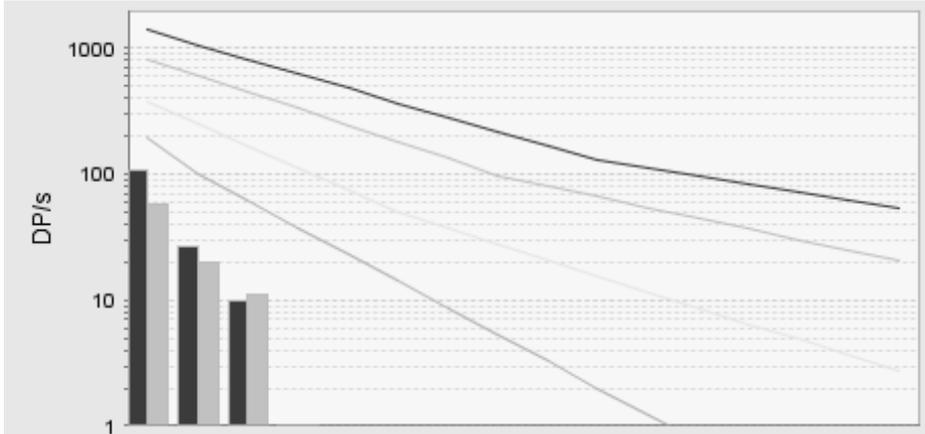


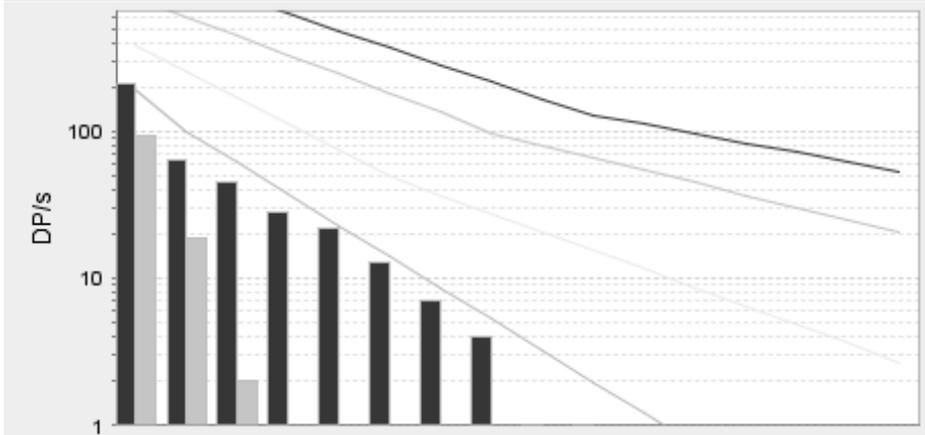
Figura 4.16 - Tipos de Descargas Parciais e Seus Mapas Estatísticos
Fonte: Hudon *et. al*, 2005, pg. 304-317

As Descargas Parciais também podem ser representadas no plano 2D, a qual a norma IEEE 1434-2014 exemplifica em seu anexo C e é mostrado na Figura 4.17. Esta representação por ser mais simples é mais fácil de se identificar padrões válidos de DPs, a qual se baseia para diagnóstico a posição e formato das curvas positivas e negativas no gráfico, este apresenta como eixos a magnitude e taxa de repetição dos pulsos de descargas parciais.

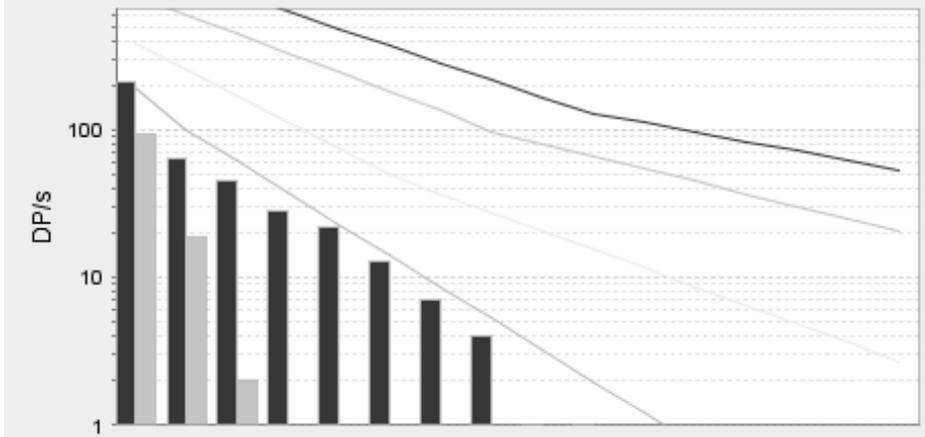
DPs Internas



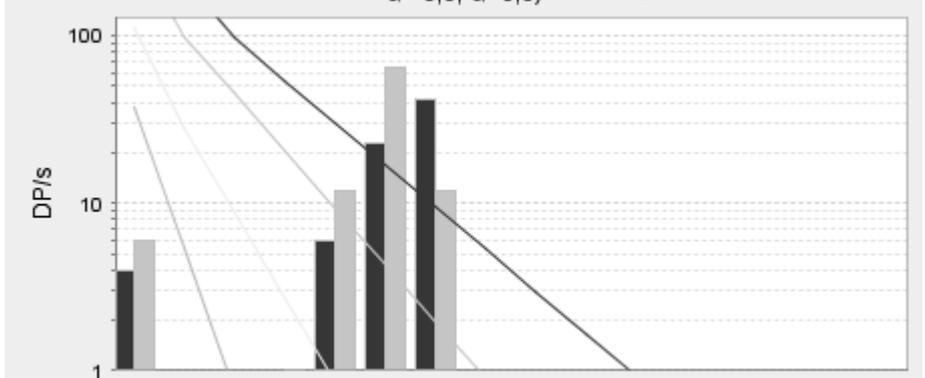
Dps de Ranhura



DPs Externas no Revestimento (Corona)



DPs Gaps



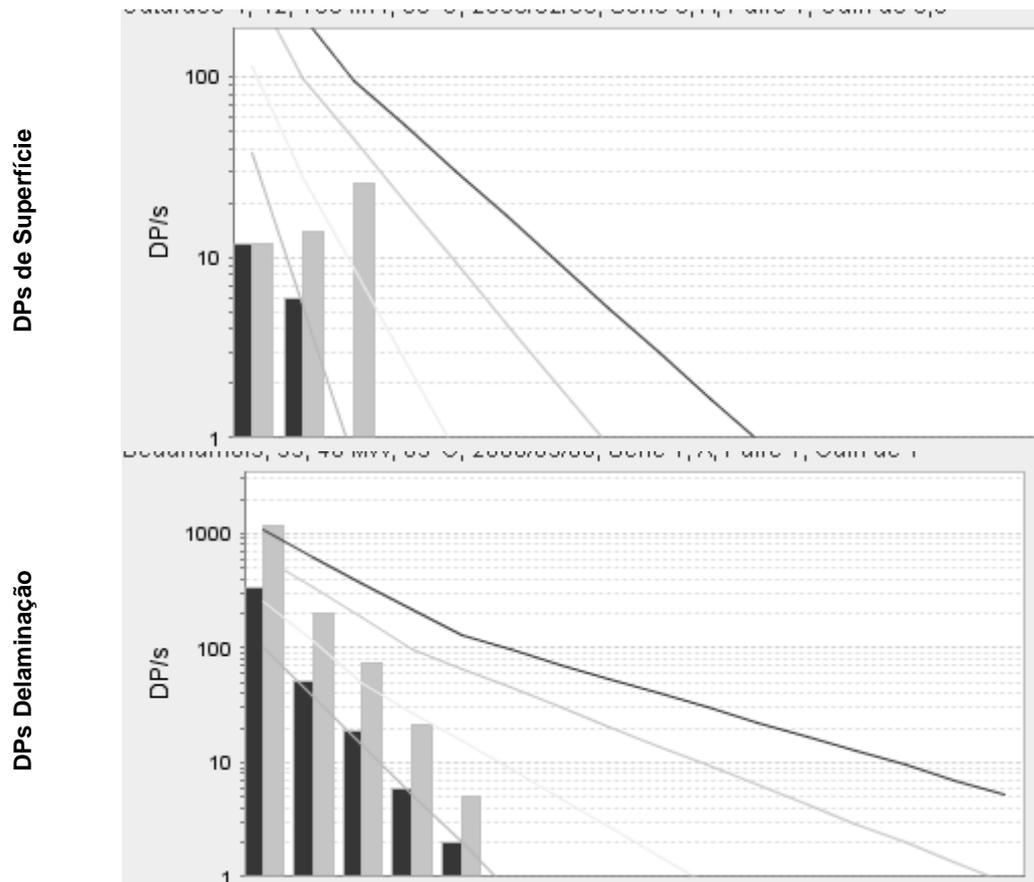


Figura 4.17 - Padrões de Descargas Parciais
Fonte: Adaptado IEEE 1434, 2014

A norma IEEE 1434-2014 estabelece alguns parâmetros para interpretação dos gráficos:

- **DPs Internas** – $PD+ \approx PD-$. Amplitude: Baixa à intermediária
- **DPs de Ranhura** – $PD+ > PD-$. Assinatura 2D similar a DPs externas no revestimento (corona); Amplitude: Intermediária
- **DPs Externas no Revestimento (Corona)** – $PD+ > PD-$. Assinatura 2D similar a DPs de ranhura, Amplitude: Intermediária à alta
- **DPs Gaps** – $PD+ \approx PD-$ (nem sempre). Descida não uniforme da taxa de repetição versus a amplitude e há a presença de uma lombada em amplitudes superiores. Amplitude: Média à alta.
- **DPs de Superfície** – Geralmente $PD- > PD+$. Descida não uniforme da amplitude. Podem ser confundidas com DPs Gaps. Amplitude: alta
- **DPs Delaminação** – $PD- > PD+$. Descida Uniforme da taxa de repetição versus a amplitude. Amplitude: Baixa à Intermediária.

4.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se realizar medições de descargas parciais e tentar capturar o sinal resultante, deve-se ter em mente que nem sempre este sinal será sem nenhuma interferência, muitas vezes ele pode vir atenuado ou deformado. A própria questão da montagem do circuito de medição não é trivial e ruídos podem intervir durante o teste, estes fatos podem vir a ocasionar alterações no sinal.

Há ainda de se considerar a alteração que a própria descarga parcial causa no seu meio, o que acarreta de influenciar a próxima descarga; este tipo de ocorrência é tido como efeito de propagação ou de memória. Ou ainda pode se ter o problema de sinais sobrepostos ou as descargas serem muito rápidas e o equipamento não detectá-las.

CAPÍTULO 05 - IMA-DP

5.1. INTRODUÇÃO

Com as atualizações dos sistemas de monitoramento, requisições de maior quantidade e qualidade das máquinas geradoras tornou-se crucial extrair o máximo de informações dos equipamentos de monitoramento já existentes. Na atual situação do sistema elétrico brasileiro, não se pode mais pensar em equipamentos de média e alta tensão sem monitoramento a respeito das descargas parciais, que são cruciais para averiguar a situação de isolamento de componentes como geradores, linhas de transmissão, motores, subestação blindada e transformadores, por exemplo. A preocupação de sempre tentar manter esses equipamentos em pleno funcionamento vem de que a indústria elétrica é forçada a reduzir custos constantemente e máquinas em bom estado e com níveis bons de monitoramento acarretam em menores prejuízos as empresas envolvidas em todo processo energético.

A norma IEC 60270 define descargas parciais como descargas elétricas localizadas na união entre dois condutores, através do isolamento, que pode ou não ocorrer próximo de um condutor e a medição síncrona de múltiplos canais é uma poderosa ferramenta na detecção, localização e separação dos sinais de descargas parciais e ruídos de fundo quando há realização de testes em transformadores trifásicos, motores, geradores e cabos.

Comprovadamente a medição de DP é um dos métodos mais eficazes de se detectar problemas na isolamento de equipamentos de alta tensão e diante desta realidade de manutenção tem-se a necessidade de se ter novas alternativas para que essas medições sejam realizadas já que grande parte dos equipamentos e softwares utilizados para este fim são importados, geralmente provenientes da América do Norte e da Europa, o que muitas vezes dificulta treinamento e requerimento de manutenção destes equipamentos já que não são nacionais e na grande maioria das vezes só podem ter sua manutenção efetuada pela própria equipe da empresa detentora da criação do equipamento.

Outro ponto negativo seria a questão dos custos que são bem mais elevados do que quando se trata de um equipamento nacional, no qual haveria melhor acesso para manutenção, sugestões de melhorias para o equipamento e treinamento.

5.2. INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO E ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS (IMA-DP)

O CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) vem ao longo dos anos aprofundando as suas pesquisas no meio do setor elétrico e ampliando os estudos em âmbitos de medição, armazenamento e análise através de sistemas computacionais, e possui modelos de avaliação operativa e diagnóstico de máquinas rotativas. Além das

grandezas mais usuais medidas como térmicas e mecânicas dos equipamentos em operação, possui técnicas para avaliar ainda o desempenho dielétrico do isolamento estatórico, ou seja, a medição e avaliação das descargas parciais.

De base disso o CEPEL tentou desenvolver um sistema que implicasse em flexibilidade, a cargo de ser adaptado a medições em diferentes máquinas, já que cada máquina possui suas devidas particularidades, tanto em termos físicos, químicos, elétricos quanto de operação do equipamento o que implica em condições e níveis de descargas parciais diferentes. (Carvalho *et al.*, 2004).

Como posteriormente mencionado há muitos problemas relacionados a sistemas comerciais utilizados nas empresas do setor primeiramente há a questão dos altos custos para obtenção de um novo sistema, upgrades de sistema e equipamentos costumam ser onerosos e, se não forem efetuados o sistema adquirido torna-se obsoleto. Outro empecilho são questões à respeito dos treinamentos que em muitos casos são superficiais ou não tem uma frequência adequada para atualização constante dos especialistas que irão manusear o equipamento, dentre outras dificuldades que ocorrem no cotidiano do técnico.

O Cepel no início dos anos 2000 decidiu, diante destas dificuldades, iniciar o desenvolvimento de um sistema de medição de descargas parciais. Contando com o conhecimento e experiência de seus especialistas e com o apoio técnico das empresas Eletrobras, em especial da Eletronorte, o sistema denominado IMA-DP representa uma independência tecnológica importante para um país em desenvolvimento (Amorim *et al.*, 2014).

5.3. O SISTEMA IMA-DP

5.3.1. Circuito de Ensaio

O sistema IMA-DP se fundamenta na norma internacional IEC 60270 que rege a maioria dos ensaios em DP. Em especial, quando possível, a medição é realizada pelo método convencional, denominado método eletromagnético. Nele, um acoplador capacitivo é inserido paralelamente ao enrolamento e, através de uma impedância de medição é possível mensurar as grandezas relacionadas aos sinais de descargas parciais, conforme apresentado na Figura 5.1

Os sinais de descargas parciais são, portanto, medidos a partir de capacitores de acoplamento (C_k) conectados em pontos pré-definidos ao longo dos circuitos das fases do enrolamento estatórico. Conforme as características do gerador e a filosofia de medição podem ser instalados diversos acopladores por circuito, um exemplo que se pode citar é o critério utilizado pela *IRIS POWER* que determina que devem ser instalados pelo menos um par de acopladores por fase, dependendo do tamanho e índice de DPs esta quantidade pode vir a ser maior. Não existe uma forma precisa utilizada para definir o número exato de

acopladores necessário a cada instalação. De todas as formas, qualquer critério que viesse a ser adotado não seria possível de se quantificar com precisão o nível das descargas e nem estabelecer sua posição relativa dentro do estator, o que se pode determinar são áreas de maior probabilidade de ocorrência de descarga parcial de acordo com o nível de tensão a qual cada barra é submetida. O que é apresentado, portanto, é a uma porção do isolamento sendo monitorado, que ao ponto de vista técnico é suficiente para avaliar o equipamento (Amorim *et al.*, 2014).

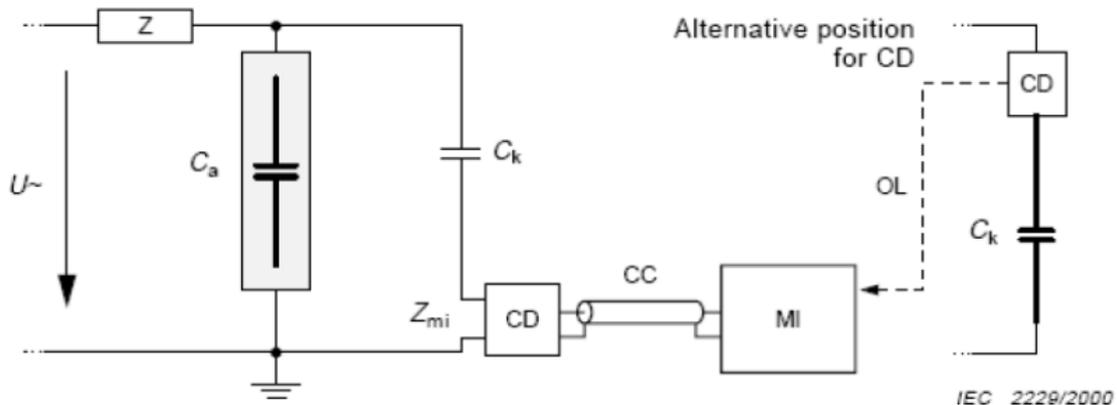


Figura 5.1 - Arranjo do Circuito de Ensaio
Fonte: Amorim *et al.*, 2014, pg.02

No qual:

- Z – Filtro passa baixa de alta tensão
- C_a – Objeto sob teste (representado por uma capacitância)
- C_k – Capacitor de Acoplamento
- CD – Impedância de Medição
- CC – Cabo coaxial
- MI – Sistema de Medição Digital

5.3.2. Sistemas Digitais de Medição de Descargas Parciais

De acordo com (Lemke *et al.*, 2008) o estado da técnica em sistemas digitais de medição de DP apresenta a estrutura mostrada na Figura 5.2, no qual um sistema de medição digital recebe dois sinais de entrada: o sinal de DP, originário diretamente do circuito de medição, e um sinal correspondente à tensão de ensaio aplicada ao objeto, que no caso do monitoramento *online* corresponde à própria tensão de operação da máquina ensaiada.

Essencialmente, um sistema de medição de DP deverá registrar, para cada pulso: sua amplitude, o instante ou o ângulo de fase de sua ocorrência (em relação à tensão aplicada) e o valor da tensão aplicada neste instante. O sinal de DP, após passar por um circuito

analógico destinado ao casamento de impedâncias, será digitalizado simultaneamente com o sinal da tensão aplicada.

Em seguida, a etapa de processamento digital dos sinais, em substituição aos tradicionais circuitos analógicos utilizados na medição de DP, realiza as operações de filtragem de acordo com a banda de medição selecionada e a detecção de pico para a medição da amplitude das DP. Além do mais, na etapa de processamento de sinais, a forma de onda dos pulsos de DP pode ser registrada e processada. É nessa etapa, portanto, onde algoritmos de supressão de ruído e de classificação dos pulsos são implementados. Para o processamento digital dos pulsos de DP faz-se necessária uma grande velocidade de processamento, atingida em muitos casos pela implementação dos algoritmos de processamento diretamente em hardware, em dispositivos FPGA (**Field Programmable Gate Array**, em tradução para português significa Arranjo de Portas Programável em Campo) que são essenciais, pois possibilita que suas funcionalidades sejam definidas pelo usuário e não pelo fabricante. (Carvalho *et al.*, 2015)

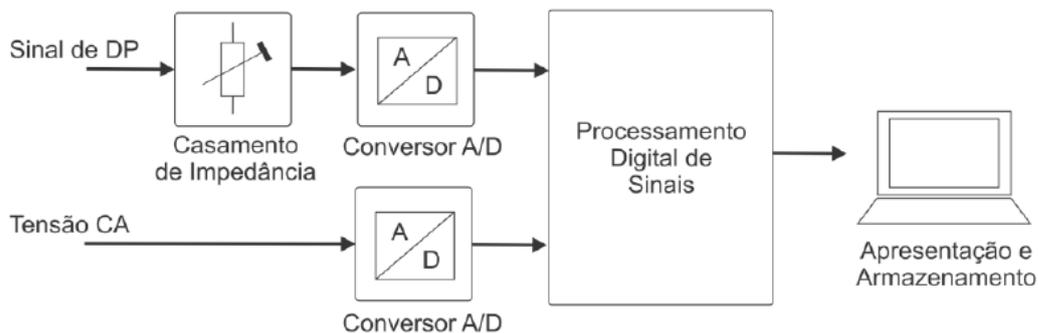


Figura 5.2 - Esquema de um Sistema de Medição Digital de DP
 Fonte: Carvalho *et al.*, 2015, pg.02

A sequência de um processamento de um sistema digital de medição de descargas parciais pode ser descrito em sete etapas de acordo com (Carvalho, 2014) e são apresentadas a seguir e exemplificadas na Figura 5.3.

1. Eliminação dos ruídos harmônicos da rede elétrica com medição de tensão aplicada;
2. Filtragem passa-altas dos sinais em 1 MHz;
3. Filtragem dos ruídos de espectro discreto;
4. Redução de ruídos de banda larga;
5. Identificação e detecção de pico dos pulsos individuais de DP;
6. Classificação dos pulsos;
7. Compactação da informação no mapa PRPD.

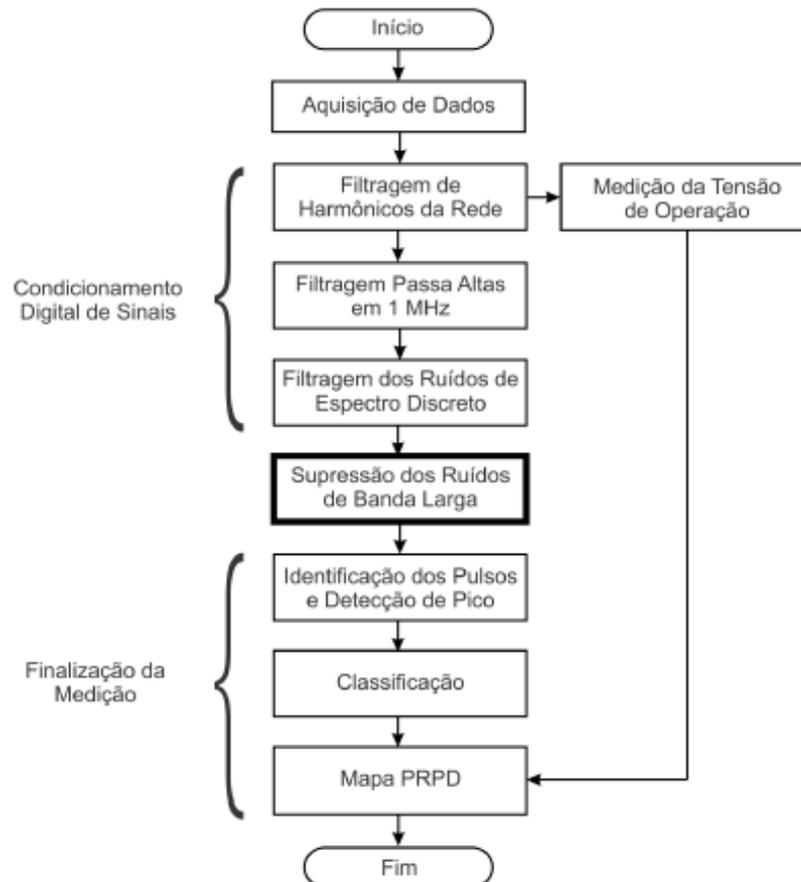


Figura 5.3 - Fluxograma geral do processamento dos sinais de DP
 Fonte: Carvalho, 2014, pg.37

5.4. INSTRUMENTAÇÃO MODULAR

Um sistema de Instrumentação Modular, por definição, utiliza componentes compartilhados e um software definido pelo usuário para satisfazer a necessidades específicas de medição (National Instruments, 2016). A partir de módulos funcionais genéricos, instrumentos específicos podem ser desenvolvidos beneficiando-se das tecnologias dos computadores comerciais, com dimensões reduzidas, menores custos e total flexibilidade.

No caso da medição de DP, os componentes do hardware de medição possivelmente compreenderão, além da CPU: digitalizadores de alta velocidade, unidades de processamento em FPGA, analisadores de espectro, comutadores de sinais e portas de conexão aos sistemas de supervisão dos equipamentos. O software de medição e processamento dos sinais, em substituição dos circuitos analógicos de processamento outrora utilizados para a medição de DP, constituirá a essência e o centro do sistema de medição baseado em instrumentação modular.

No intento da medição *online* em máquinas rotativas, os sistemas de instrumentação modular podem destinar-se à medição ou à monitoração. Por definição, um sistema de medição é concebido para ser portado aos diversos equipamentos e realizar medições

esporádicas de DP, atendendo a um cronograma de manutenção preditivo previamente planejado. Por outro lado, um sistema de monitoramento incorpora, além das funções de medição, a robustez e as características necessárias para ser instalado permanentemente junto aos equipamentos de alta tensão, realizando assim o monitoramento contínuo dos sinais de DP. (Carvalho *et al.*, 2015)

O IMA-DP compreende a especificação de um hardware de medição compatível e de um software de processamento digital de sinais capaz de eliminar os diversos tipos de ruídos típicos em medições de DP, bem como filtrar, identificar e quantificar os sinais de DP úteis ao diagnóstico preditivo.

Beneficiando-se da flexibilidade dos sistemas de instrumentação modular, três configurações básicas foram propostas:

- **IMA-DP Monitor:** como um sistema fixo de monitoramento *online*;
- **IMA-DP Autônomo:** como um sistema portátil de medição;
- **IMA-DP Intensivo:** como um sistema de monitoramento móvel, capaz de ser deslocado entre os equipamentos mais críticos de uma instalação com o objetivo de realizar avaliações mais detalhadas da evolução das DP.

Para a especificação geral do sistema IMA-DP as seguintes características da medição de DP foram adotadas:

- Conforme as características típicas dos sinais de DP medidos em máquinas síncronas determinou-se uma faixa dinâmica de 20 V sendo esta suficiente para o registro de quaisquer sinais, ou seja as faixas de descargas parciais compreendem valores que estão entre -10 V a +10 V.
- Como requisito essencial do hardware de aquisição, este deve atender às especificações de um sistema de medição na banda HF, isto é, possuir largura de banda da ordem de 30 MHz com frequência de corte inferior em 1 MHz.

Para atender às especificações acima, o conversor A/D deverá atender à banda de medição especificada e, de acordo com o critério de Shannon-Nyquist, também conhecido como Teorema da Amostragem, a taxa de aquisição do sistema de medição deverá ser superior a 60 MS/s. Seleciona-se portanto, com alguma margem de segurança, a taxa de aquisição de 100 MS/s. Considerando a faixa dinâmica de 20 V, o número de bits do conversor A/D deverá ser tal que ainda nessa faixa tenha-se uma boa resolução vertical. (Carvalho, 2014)

A Usina de Tucuruí tem implementada as três versões do IMA-DP estas as quais tem o objetivo primordial de diminuir a dependência do especialista e tornar a aquisição e avaliação mais periódica, caminhando para o monitoramento on-line de todas as 23 unidades geradoras. As grandezas registradas podem ser descarregadas em um banco de

dados específico que, junto com o sistema de diagnóstico poderá emitir laudos ao setor de engenharia. Trabalha-se para agregar essas informações ao sistema de gestão de ativos implantado na Eletronorte, denominado Diane, desenvolvido pelo Cepel.

As unidades geradoras da UHE Tucuruí possuem, devido às suas dimensões, uma quantidade razoável de acopladores capacitivos, que dependendo da máquina varia em 24, 16 ou 12 acopladores instalados, isto devido as particularidades de cada máquina, pois têm-se fabricantes diferentes e conseqüentemente estruturas e aspectos do enrolamento estatístico distintos. Este fato, peculiar à Usina, exige um esforço considerável para o registro das medições. Sendo assim, um mecanismo mais automatizado, com facilidades de navegação e rapidez, tornam o processo mais adequado no que tange a sua realização (Amorim *et al.*, 2014).

5.4.1. IMA-DP Monitor

O IMA-DP Monitor foi a primeira solução proposta (sua primeira versão entrou em operação no ano de 2004), desenvolvida pelo Cepel em parceria com a Eletronorte. Sua arquitetura de instrumentação modular se baseia na plataforma PXI. (Carvalho *et. al*, 2015)

O PXI é uma plataforma robusta baseada em PC para sistemas de medição e automação. Esse padrão combina características elétricas do barramento do PCI com a construção modular Eurocard do CompactPCI, além de incluir barramentos de sincronização especializados e recursos de software importantes. O PXI é uma plataforma de implementação de alto desempenho e baixo custo, projetada para aplicações como o teste de fabricação, áreas militar e aeroespacial, monitoramento de máquinas, setor automotivo e teste industrial. (National Instruments, 2016)

Os componentes de um sistema PXI podem ser divididos em: Chassis, Unidade Controladora e Instrumentação Modular. O IMA-DP Monitor adota como instrumentos modulares digitalizadores de alta velocidade e *Switches* de comutação de sinais, além de uma interface de comunicação RS-485 para conexão direta via rede industrial com o sistema supervisor das máquinas. O Software do IMA-DP Monitor realiza o monitoramento contínuo *online* das DP, alimentando um banco de dados integrado à rede corporativa da empresa. (Carvalho *et. al*, 2015)

Através do IMA-DP Monitor pode se visualizar em tempo real as medições de descargas parciais, tem-se a possibilidade de enxergar os níveis de potência, temperatura, pressão, tensão, carga média da DP, etc. E ainda vários tipos de meios de analisar o problema, já que pode-se ter o mapa estatístico, o histograma de fase e o histograma de amplitude.

Outro ponto interessante da análise pelo IMA-DP é que por ter essa possibilidade de fazer medições online e todos os dados obtidos das máquinas ficam em um banco de dados é mais fácil e propício de se analisar não apenas a descarga parcial no instante que ocorre

como a tendência na qual ela está se desenvolvendo, e enxergar até mesmo os períodos do dia que ela se torna mais intensa devido aos níveis de operação que se encontra a máquina.

Utilizando equipamentos modulares comerciais que são de melhor acesso ocasiona redução de custos, pois facilita processos de manutenção, futuros reparos e atualizações do sistema. Foi acrescentado ao sistema, processos matriciais de multiplexação dos sinais de descargas parciais que permite estabelecer diferentes configurações combinando o custo do sistema em função do tempo total requerido para a varredura de todos os acopladores de um determinado conjunto de máquinas (Carvalho *et al.*, 2004).

Pelo fato das descargas parciais se tratarem de um fenômeno estatístico, então o sinal é capturado através de vários ciclos da rede e como o sinal é em alta frequência ocorre de que o sinal deve ser digitalizado com uma taxa de aquisição mínima igual ao dobro de sua maior componente de frequência, mas tal implica em problemas com armazenamentos das informações, pois os vetores provenientes dos resultados das medições seriam gigantescos e implicariam em um sistema sobrecarregado e conseqüentemente acabaria não exibindo de fato as informações úteis requeridas, já que qualquer aquisição de dados implicariam em uma lentidão no sistema dificultando acesso aos resultados.

Diante desta realidade e com o objetivo de se sair desse problema, a forma estabelecida para fazer a leitura das ocorrências de descargas parciais foi através do mapa estatístico, tal como exibido na Figura 5. 4. O sistema de aquisição, a cada ciclo, capta um trem de pulsos e faz o registro em um gráfico de superfície, no qual observa-se a criação do perfil de uma senóide, tal como visto nos padrões estabelecidos no capítulo 04. O eixo horizontal representa a fase e o vertical indica a amplitude em volts (V), o nível da coloração implica na quantidade de ocorrências de descargas parciais em determinada amplitude e fase ao longo de vários ciclos de aquisição de dados.

Na construção deste mapa cada vetor com um trem de pulsos é excluído logo após seu processamento, ocorrendo assim que a informação crucial seja logo adquirida e condensada, implicando assim em economia de memória e armazenamento de dados. Claro que parte da informação é perdida ao longo da aquisição dos dados, pois depende-se das dimensões das matrizes que criaram os mapas, e essa matriz não contém todos os valores precisos, já que para se condensar os dados parte da informação dos valores de amplitude e fase são discretizados, mas embora parte da informação seja suprimida, não implica em danos na leitura dos resultados já que estes acabam sendo extremamente próximos da realidade do fenômeno das descargas parciais no equipamento testado (Amorim *et al.*, 2007).

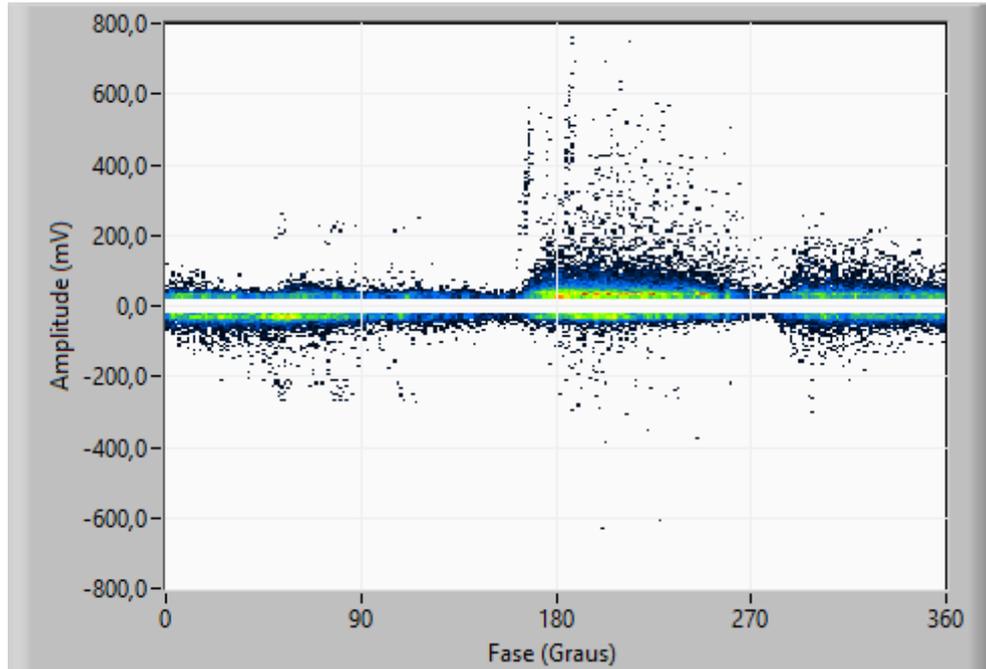


Figura 5.4 - Mapa Estatístico

O sistema do IMA-DP Monitor é composto basicamente de três subsistemas integrados: medição, operação e análise. O sistema de medição tem o objetivo de capturar e registrar os sinais de descargas parciais na forma de mapas estatísticos, por sua vez ao sistema de operação é cabível a responsabilidade da configuração e ajuste do hardware de medição, e o sistema de análise apresentará ferramentas para visualização dos dados provenientes dos testes e do tratamento das informações anteriores encontradas no banco de dados ao longo do tempo, a fim de ter-se um meio de sempre se ter acesso aos diagnósticos dos equipamentos monitorados. Os sistemas tem sua comunicação interligada pela rede, acessando-se um banco de dados comum, tal como exemplificado na Figura 5.5.

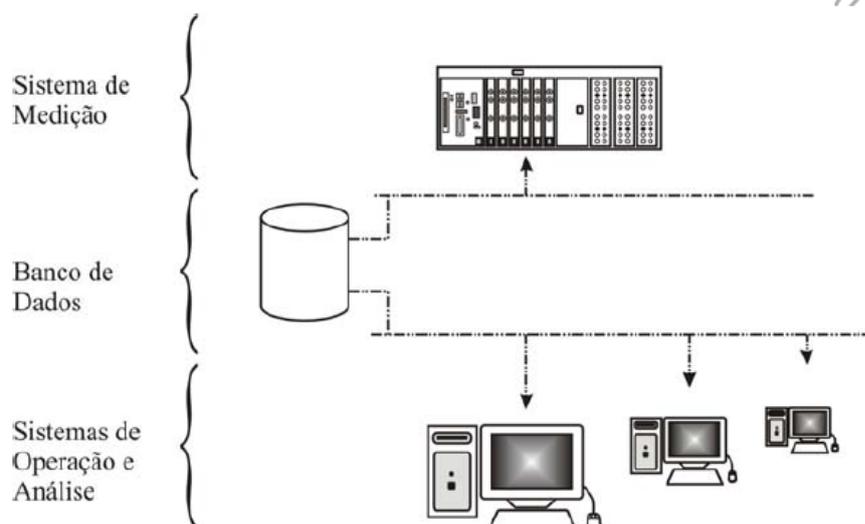


Figura 5.5 - Topologia do Sistema de Medição
Fonte: Amorim *et al.*, 2007, pg.04

O sistema foi concebido como um meio de que em âmbitos computacionais virtuais não houvesse limites no número de sinais monitorados, portanto para suportar tal demanda aquisitiva de dados o hardware deve ser dimensionado pelo sistema de operação para que o número de canais de medição possa ser aumentado sem maiores complicações.

O hardware de medição é formado por uma ou mais unidades independentes de medição, estes são computadores industriais no padrão PXI. Cada chassis PXI tem um módulo controlador, e diversificados cartões digitalizadores com alta taxa de velocidade, e ainda alguns módulos de chaves comutadoras, que é apresentado na Figura 5.6.

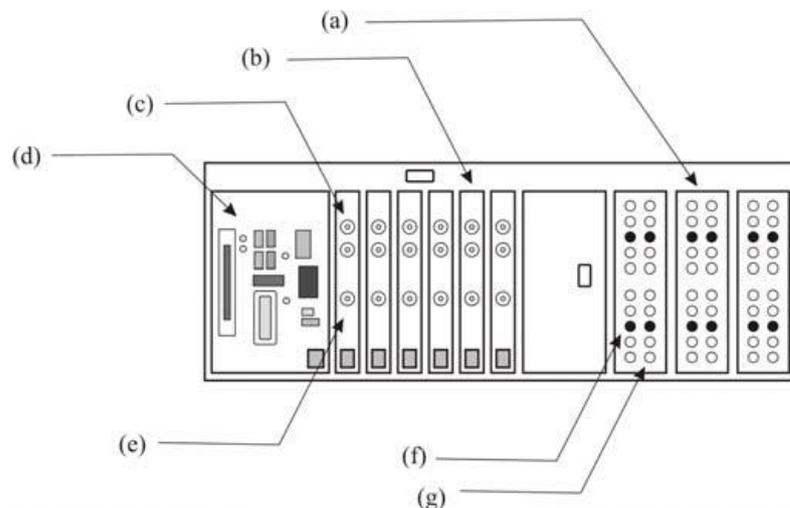


Figura 5. 6 - Unidade do Hardware de Medição: Chassis PXI. a) Módulos de Chaves Comutadoras. b) Cartões Digitalizadores de Alta Velocidade. c) Canais de Digitalização. d) Módulo Controlador. e) Entrada do Sinal de Trigger Externo. f) Canal de Saída de uma Chave Comutadora, Cor Preta. g) Quatro Canais de Entrada de uma Chave Comutadora, Cor Branca
 Fonte: Amorim *et al.*, 2007, pg. 05

Explanando em termos gerais a figura anterior os cartões digitalizadores utilizados possuem 8 bits de resolução com taxas de amostragem de até 100MHz, do lado dos cartões digitalizadores há alguns módulos de chaves comutadoras, estes módulos tem a função de expandir o número de canais de aquisição, ocasionando que em cada chave comutadora entra quatro sinais de DP, que por sua vez serão aquisitados continuamente por um único canal em uma placa de aquisição. Os sinais de sincronismo de vários circuitos de medição de DP alimentam as entradas de trigger externo das placas.

Ao se realizar este tipo de medição, o PXI primeiramente busca todos os parâmetros requisitados e após o posicionamento da chave comutadora para o canal certo, o sistema realiza o número de aquisições requerida e processa os dados na sua placa de aquisição respectiva. Todos esses dados são registrados no banco de dados do sistema.

Ao tratar-se do sistema de operação, tem que se ter a visão que este há dois pontos distinto no qual um é a configuração do hardware de medição e o outro é a solicitação de medições.

Partindo para a primeira situação no qual é importante frisar que a configuração do hardware é remota e registrada pelo sistema de operação no banco de dados, implica que cada PXI ao iniciar suas atividades sempre utiliza como base dados já pré-estabelecidos e registrados no banco de dados. Neste o administrador configura parâmetros de aquisição das placas e das chaves, estas já explicadas anteriormente, especificando que canal irá monitorar cada sinal disponível de DP.

Esta divisão tem em uma das suas funções principais conseguir transparecer a instrumentação para o usuário que irá realizar as futuras medições, ou seja, após esta configuração o usuário operador do sistema apenas precisará se preocupar em estabelecer o período e ponto específico que deseja realizar a medição da máquina requerida, a instrumentação torna-se deste modo totalmente virtual, uma forma clara de como isso corre é exemplificado na Figura 5.7.

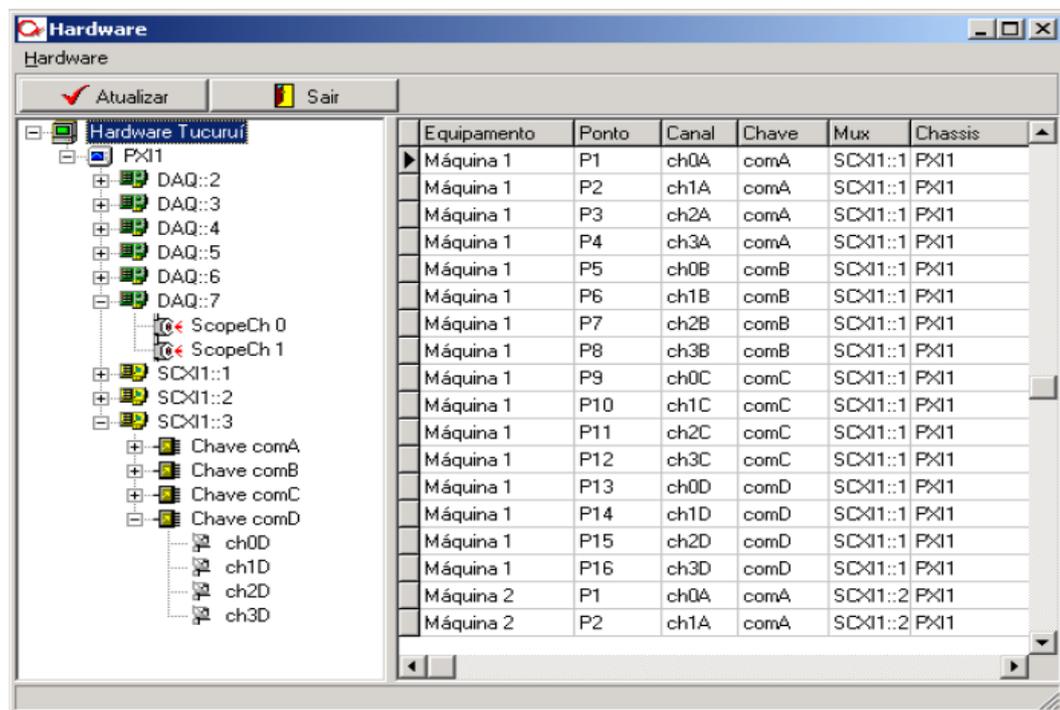


Figura 5.7 - Janela de Configuração do Hardware
Fonte: Amorim *et al.*, 2007, pg. 06

Tratando-se agora do momento de solicitação das medições que seria o passo após a configuração do hardware, neste o usuário do sistema tem a visão de todos os pontos monitorados pelo sistema de todas as máquinas e acopladores respectivos destas integradas ao IMA-DP, tais máquinas podem pertencer a apenas um polo ou a várias unidades distintas, ou seja, não necessariamente pra haver o monitoramento tem que se estar com o software instalado apenas na unidade (uma usina, por exemplo) e este só poderá ser enxergado pelo operador daquele local, mas outros que possuem acesso ao sistema de monitoramento também podem acompanhar, o que é extremamente útil ao se

tratar de empresas como a Eletrobras que possui várias usinas e precisa ter um controle mais amplo do que ocorre em seus maquinários.

Ao se selecionar os pontos desejados o usuário programa de forma livre as medições almejadas, esta pode ocorrer de três formas: por agendamento prévio, em reposta a um evento (condições adversas de temperatura e potência da máquina, por exemplo) ou por um determinado período, neste último caso é o monitoramento já automático e online no qual os dados gerados formam um banco de dados consistentes que servirá para que o histórico da máquina seja melhor acompanhado.

No caso da UHE Tucuruí e mais especificadamente se tratando da casa de força 1 e das unidades geradoras 1 e 2, diferenciou-se os endereços das portas, um para cada máquina, tendo esta realidade foi possível conectar-se o cabo da porta RS-485 ao sistema IMA-DP e assim poder exibir informações de ambas as máquinas, informações não apenas das descargas parciais em si, mas também das condições da máquina como temperatura, potência, tensão, etc. Na Figura 5.8 é mostrado a interface de solicitação e acompanhamento das medições da última versão do IMA-DP.



Figura 5. 8 - Interface para Solicitação e Acompanhamento das Medições

O sistema de análise permite visualizar e moldar as informações do banco de dados das medições concretizadas estes resultados podem ser tratados de forma geral ou individualmente, tudo depende da linha que se quer seguir.

Os mapas estatísticos gerados são apresentados como um gráfico de superfície, e através desta representação informações cruciais são extraídas como número de descargas parciais, o tipo de ocorrência e ainda pode-se ver gráficos secundários que exibem

histogramas de fase e amplitude das descargas parciais, o que implica em verificar o nível de gravidade de DP no maquinário. E ainda importante evidenciar que por ser um sistema que armazena todas as informações das descargas parciais é possível ter-se um histórico consolidado e assim tem-se um meio de ter-se o perfil evolutivo da descarga parcial.

Para compreender melhor toda a forma da instalação e como ela se estabelece na UHE Tucuruí exibe-se a instalação padrão do sistema IMA-DP e a plataforma PXI, tais apresentados nas Figura 5.9 e Figura 5.10 respectivamente (Amorim *et al.*, 2007).

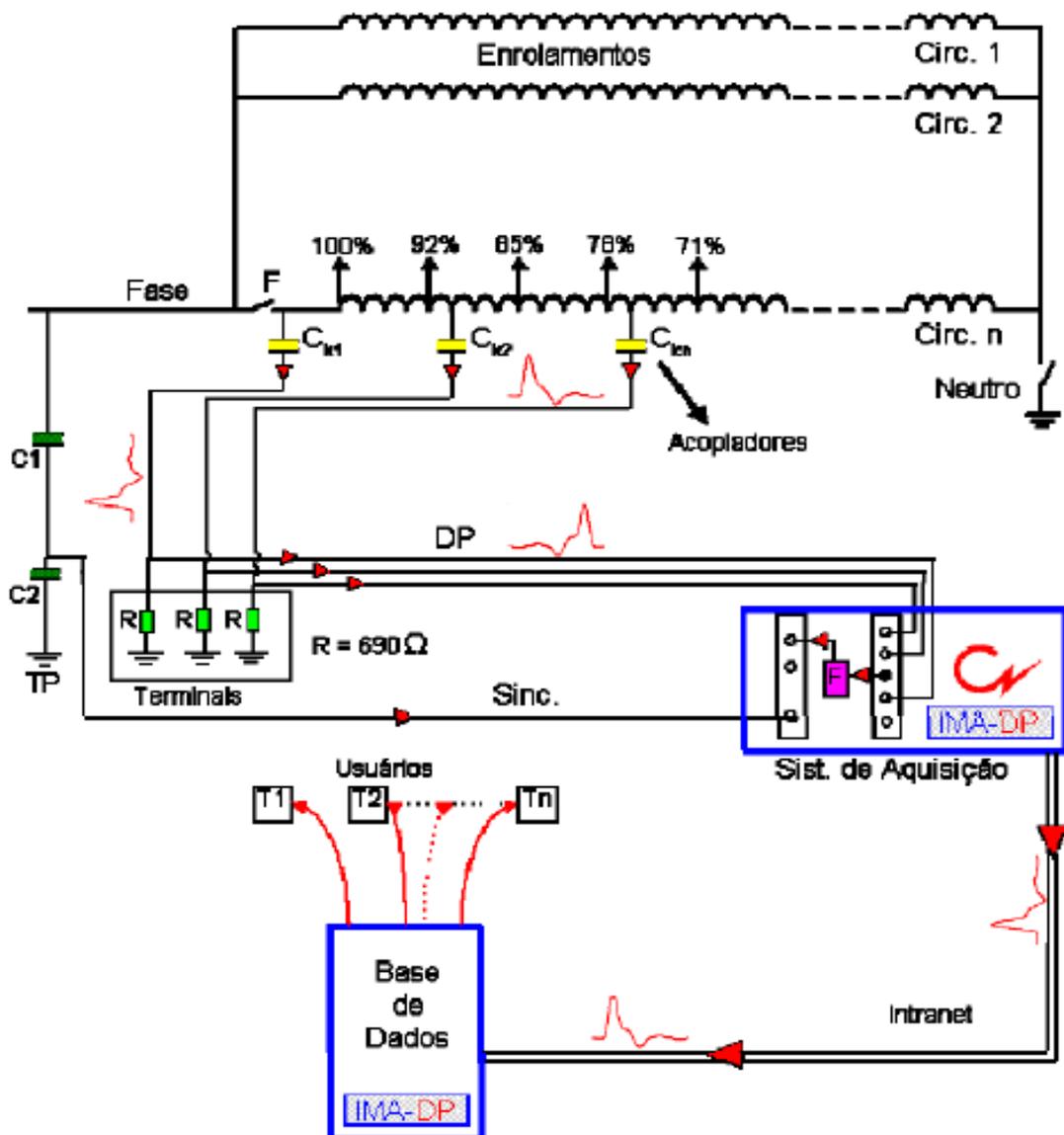


Figura 5.9 - Instalação Padrão do Sistema do IMA-DP
Fonte: Amorim *et al.*, 2007, pg. 08



Figura 5.10 - Sistema IMA-DP - Plataforma PXI com Filtros de DP e Divisores de Tensão para o Sinal de Sincronismo

Fonte: Amorim *et al.*, 2007, pg. 08

5.4.2. IMA-DP Autônomo

O IMA-DP Autônomo foi criado com o propósito de atender à demanda de medições *online* realizadas esporadicamente em máquinas rotativas com sensores permanentemente instalados. Sua proposta é uma alternativa de baixo custo à substituição de sistemas de medição obsoletos adquiridos pelas empresas. Sendo a solução mais econômica das três configurações, o IMA-DP Autônomo utiliza como arquitetura de instrumentação modular a utilização de uma placa de osciloscópio de conexão USB conectado ao Notebook. Através de cabos coaxiais interligando os terminais da caixa de conexão ao osciloscópio, pode-se registrar de maneira rápida e eficiente os sinais oriundos de cada terminal. (Carvalho *et al.*, 2015; Amorim *et al.*, 2014)

A Figura 5.11 mostra o IMA-DP autônomo e a caixa de acesso aos terminais dos sinais de DP, onde são realizadas as medições periódicas e na Figura 5.12 exibe-se a interface atual do software a qual é possível realizar a medição, ver o mapa PRPD, histogramas e uma visualização 3D do sinal obtido. A Figura 5.13 apresenta o resultado da avaliação de uma máquina a qual as cores ao lados dos mapas de cada acoplador apresentam o nível de severidade da descarga parcial.

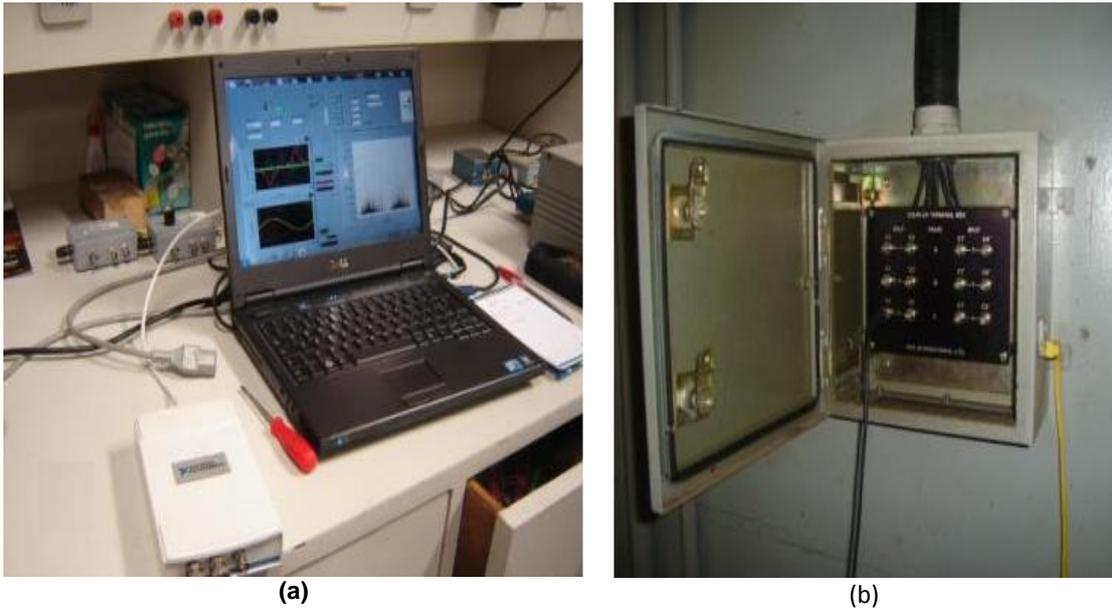


Figura 5.11 - IMA-DP Autônomo: (a) Sistema, (b) Terminais de acesso aos sinais de DP do gerador

Fonte: Carvalho et al., 2015, pg.04

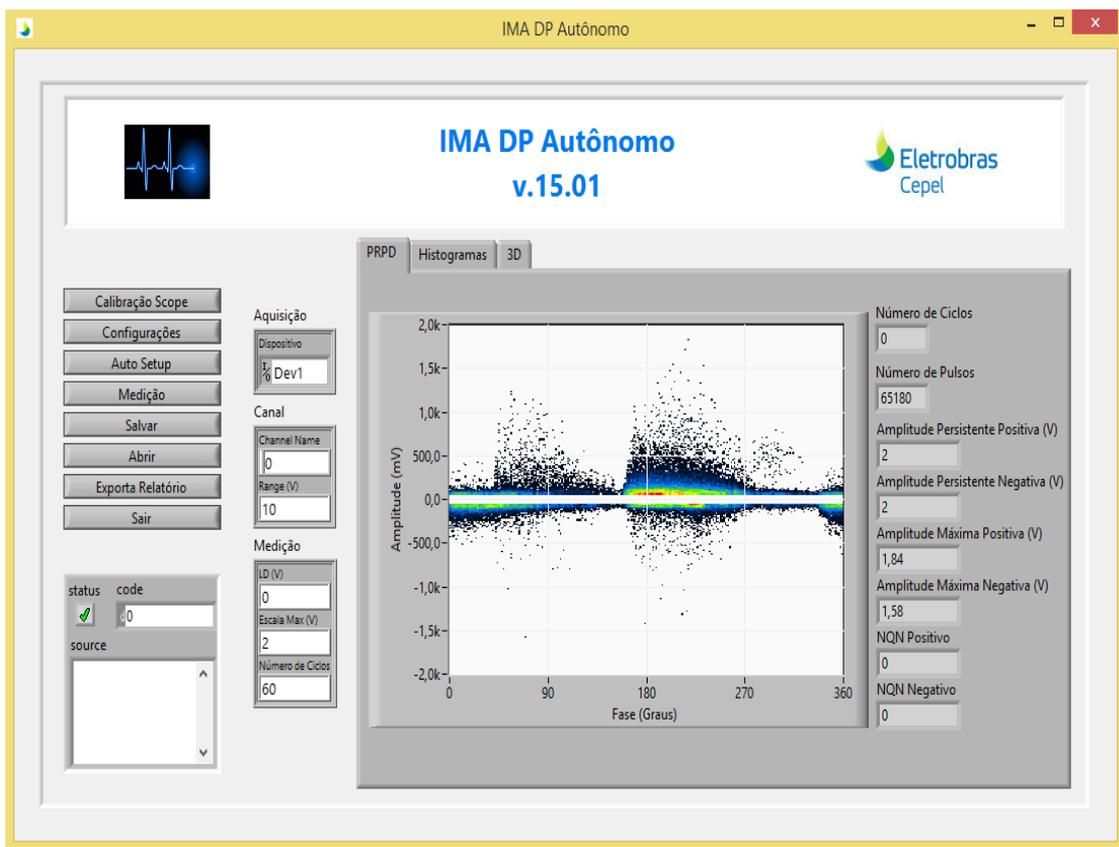


Figura 5.12 - Interface do IMA-DP Autônomo

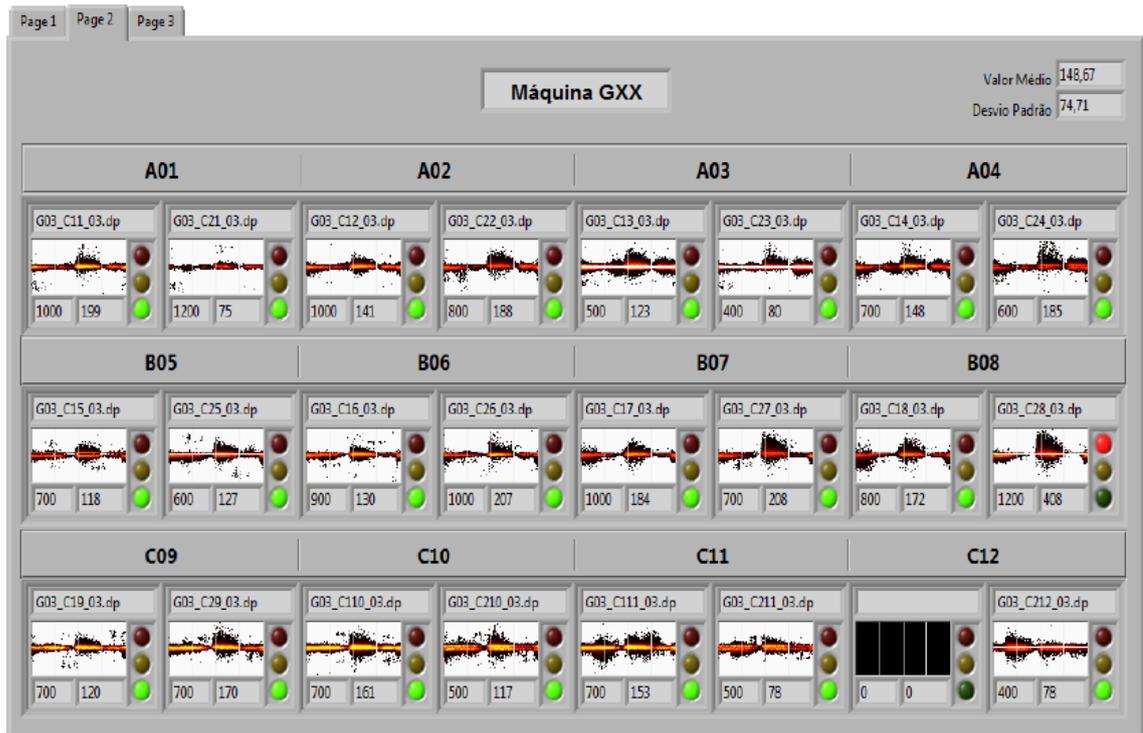


Figura 5.13 - Tela de avaliação das medições realizadas com o IMA-DP Autônomo
Adaptado: Carvalho *et al.*, 2015

5.4.3. IMA-DP Intensivo

A partir da experiência com o IMA-DP Monitor e dos resultados obtidos com o IMA-DP Autônomo, foi concebido o sistema IMA-DP Intensivo como um meio termo entre a solução do monitoramento contínuo e a medição autônoma e esporádica.

O IMA-DP Intensivo assemelha-se quanto ao hardware ao IMA-DP Monitor, utilizando como arquitetura de instrumentação modular a plataforma PXI. No entanto, o sistema foi concebido para poder ser alocado em diferentes máquinas, privilegiando aquelas cuja situação do dielétrico (previamente diagnosticada pelo IMA-DP Autônomo) requeira maior atenção e acompanhamento. Com relação ao software, portanto, o IMA-DP Intensivo assemelha-se ao IMA-DP Autônomo, não sendo conectado à rede corporativa da empresa nem à rede industrial dos sistemas supervisórios.

A arquitetura do IMA-DP Intensivo apresenta como vantagens:

- Maior simplicidade em relação ao sistema de monitoramento contínuo, em relação à instalação e operação;
- Mobilidade entre máquinas para priorizar as mais críticas;
- Independência de conexões à rede corporativa, à rede industrial da operação, ao sistema supervisório;
- Redução de custos em relação à instalação de sistemas de monitoramento permanente;

- Foco do monitoramento e diagnóstico concentrado na análise das máquinas que requeiram maiores cuidados.

Estritamente em relação ao hardware da instrumentação modular, os custos do sistema Intensivo são da mesma ordem de grandeza do sistema Monitor. Os custos globais do sistema IMA-DP Intensivo, no entanto, são reduzidos não só pela ausência da estrutura de instalação permanente e do cabeamento necessário, mas pela possibilidade de selecionar de antemão que máquinas deverão ser monitoradas e quais não necessitam de monitoramento contínuo, reduzindo assim o número de sistemas adquiridos. Entretanto o sistema apresenta como desvantagem, além de não ser conectado ao sistema supervisorio, possuir uma instalação mais frágil e desprotegida, se comparada à instalação do IMA-DP Monitor. (Carvalho *et al.*, 2015)

Através da ferramenta de medição do CEPEL, o IMA-DP intensivo, este o qual fica instalado em cada gerador por um período mensal, realiza medições constantes, o que possibilita analisar no tempo em quais ocasiões de operação do gerador as descargas parciais são mais intensas ou brandas. Na Figura 5.14 apresenta-se o arranjo típico de medição empregado, com o sistema IMA-DP, apresentando-se em destaque na tela, o mapa estatístico de magnitude e fase característico da DP em análise. Na Figura 5.15 mostra-se a interface da análise de tendência de uma máquina.

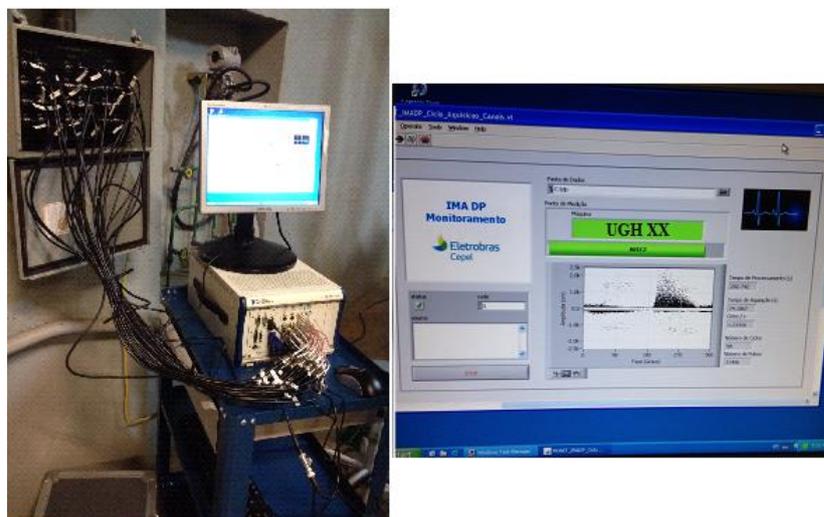


FIGURA 5.14 - Instalação e tela do sistema IMA-DP Intensivo, exemplificando o mapa estatístico da DP

Fonte: Pardauil *et al.*, 2015

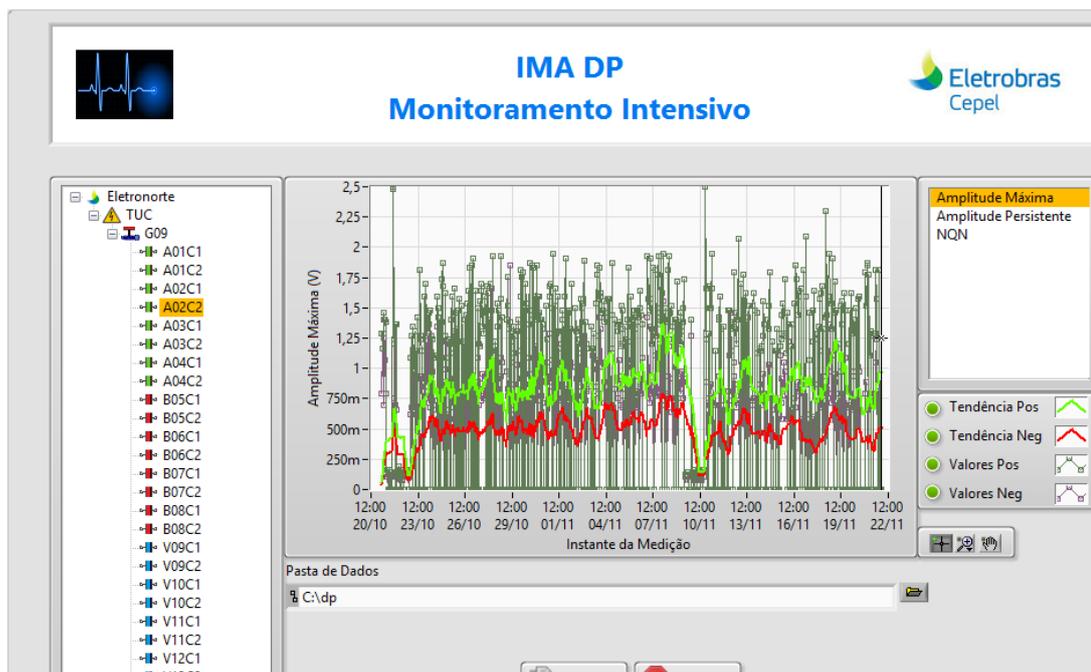


Figura 5.15 – Análise de Tendência IMA-DP Intensivo

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O IMA-DP surge diante da necessidade de conseguir medições e diagnósticos da situação da isolação do enrolamento estatórico com baixo custo, atualizações constantes, manutenções e/ou treinamentos mais acessíveis e de forma periódica, o que são vantagens com relação a sistemas comerciais.

Proporciona análises detalhadas de descargas parciais tendo vários gráficos provenientes da medição realizada que se complementam nas informações além de apresentar uma curva de tendência que é crucial para se entender o comportamento do fenômeno com mais afinco.

Com avanços a parceria entre o CEPEL e as unidades do setor elétrico, em especial o apoio técnico da Usina de Tucuruí, as necessidades e dificuldades encontradas ao longo do uso do sistema tem proporcionado atualizações e consequentemente melhora nos softwares e hardwares utilizados, ocasionando em medições e consequentemente análises mais precisas das condições do enrolamento.

Com a utilização do IMA-DP Intensivo em máquinas com intensidades de descargas parciais mais elevadas se obteve uma quantidade de dados alta com informações dos níveis de DPs e correlações com níveis de operação do gerador, no entanto analisar cada medição individualmente tornou-se complicado principalmente quando trata-se de fazer o reconhecimento do tipo de descarga, pois os padrões encontrados não são tão simples como exemplificados pela norma e esta análise demanda tempo e esforços maiores para emitir um diagnóstico, diante desta dificuldade se propôs utilizar ferramentas computacionais

para filtrar os dados e agilizar os diagnósticos emitidos pelos técnicos, tais serão apresentados nos capítulos subsequentes.

CAPÍTULO 06 – Técnicas de Mineração de Dados Aplicadas na Classificação de Descargas Parciais

6.1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento do IMA-DP e o aumento no volume de medições, teve como consequência um crescimento expressivo do banco de dados de descargas parciais dos hidrogeradores da Usina Hidrelétrica de Tucuruí e, por conseguinte, ocasionou a necessidade de agilizar o processo de emissão de diagnósticos. No entanto com esta quantidade grande de dados torna-se inexecutável avaliação por meio de ferramentas e técnicas tradicionais. A extração de informação útil tem se tornado um desafio devido a este impasse o que gera a indispensabilidade da utilização de novos procedimentos para solucionar este problema, sendo o uso das técnicas de mineração de dados, uma alternativa promissora.

A mineração de dados é uma tecnologia que combina métodos tradicionais de análise de dados com algoritmos sofisticados para processar grandes volumes de dados e se tornou uma ferramenta de descoberta de informações, que pode revelar estruturas de conhecimento, que possam guiar decisões em condições de certeza limitada. (Tan *et al*, 2009; Côrtes *et al.*, 2002).

As ferramentas e técnicas empregadas para análise automática e inteligente destes imensos repositórios são os objetos tratados pelo campo emergente da descoberta de conhecimento em bancos de dados (DCBD), da expressão em inglês *Knowledge Discovery in Databases* (KDD). Mineração de dados é a etapa em KDD que permite a extração não trivial de conhecimento previamente desconhecido e potencialmente útil de um banco de dados. (Silva, 2004; Oliveira, 2013)

6.2. MINERAÇÃO DE DADOS (DATA MINING)

6.2.1. Mineração de Dados e Descoberta de Conhecimento

A mineração de dados é uma parte integral da descoberta do conhecimento em bancos de dados (KDD), este é o processo geral de conversão de dados brutos em informações úteis. O processo é composto de várias fases de transformação, do pré-processamento dos dados até o pós-processamento dos resultados da mineração de dados, como ilustrado na Figura 6.1. (Tan *et al*, 2009)

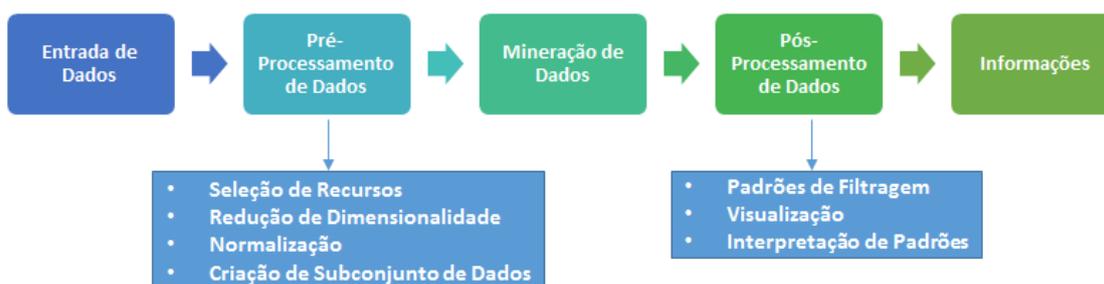


Figura 6.1 – O Processo de Descoberta de Conhecimento em Bancos de Dados (KDD)
Adaptado: Tan *et al*, 2009, pg. 04

Os dados de entrada podem ser registrados em diversos formatos como arquivos simples ou planilhas, por exemplo, e antes de ocorrer o pré-processamento há uma seleção dos conjuntos de dados e averiguação da sua relevância para o propósito requerido. Na etapa do pré-processamento é quando ocorre a transformação dos dados brutos em formatos apropriados para análises posteriores. Esta parte do processo inclui fusão de dados de múltiplas fontes, limpeza de dados para remoção de ruídos, observações duplicadas, seleção de registros e características que sejam relevantes à tarefa de mineração de dados, informações ausentes, errôneas ou inconsistentes devem ser corrigidas para não influir na qualidade dos modelos que serão obtidos ao final do processo de KDD. Devido a todos estes fatores esta é a etapa mais trabalhosa e que demanda mais tempo.

Em seguida ocorre a mineração de dados em si que consiste em uma das etapas primordiais do processo que é quando a partir dos dados transformados possibilita submeter algoritmos de descobertas de padrões. Constitui o momento de aprendizagem do sistema no qual os dados são lidos e interpretados; faz com que estes dados sejam transformados em informações úteis. Ocorre em seguida um processo de integração de resultados da mineração com os sistemas de apoio a decisões, e para esta ocorrer é necessária a etapa de pós-processamento para garantir que apenas resultados válidos e úteis serão incorporados ao sistema de apoio a decisões. (Tan *et al.*, 2009; Bueno *et al.*, 2012)

6.2.2. Tarefas de Mineração de Dados

A mineração de dados é classificada pela capacidade em realizar determinadas tarefas e são divididas em duas categorias principais: Tarefas de Previsão e Tarefas Descritivas, como representadas na Figura 6.2. (Camilo *et al*, 2009; Tan *et al.*, 2009; Bueno *et al.*, 2012; Cortês *et al.*, 2002).

Neste trabalho será utilizada uma forma híbrida das tarefas, que são apresentadas a seguir nos tópicos 6.2.2.1 e 6.2.2.2. utilizando uma técnica descritiva (Clusterização) com finalidade de agrupar padrões, e em seguida, usa-se uma árvore de decisão (técnica de classificação) para utilização como ferramenta preditiva. Estas técnicas serão apresentadas nos tópicos 6.2.3 e 6.2.4, respectivamente.

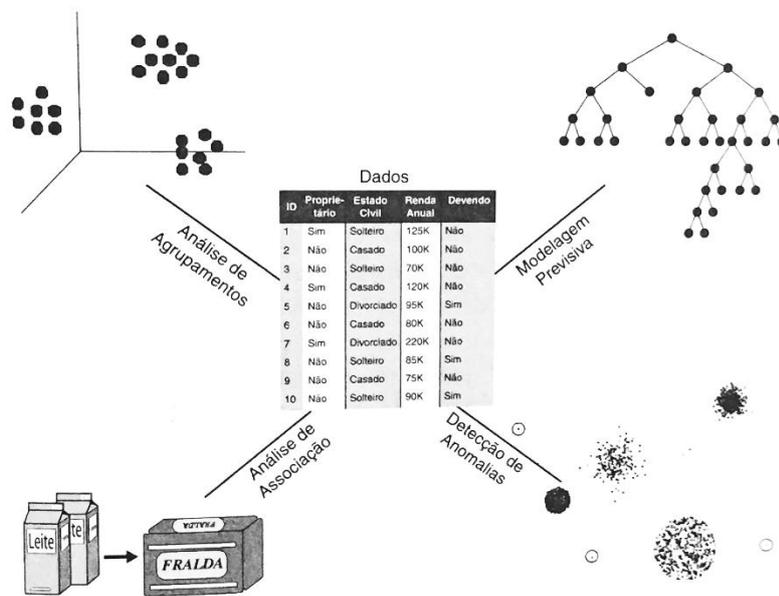


Figura 6.2 – Quatro das tarefas centrais de mineração de dados
 Fonte: Tan *et al.*, 2009, pg.09

6.2.2.1. Tarefas de Previsão

Tem o objetivo principal de prever os valores de um determinado atributo baseado nos valores de outros atributos. O atributo previsto é conhecido como *variável dependente* ou *alvo* e os utilizados para a previsão como *variáveis independentes* ou *explicativas*, nestes destaca-se classificação supervisionada: árvore de decisão, redes neurais e SVMs (*Support Vector Machine*).

Este tipo de modelagem visa construir um modelo para a variável alvo como uma função de variáveis explicativas, que busca prognosticar o comportamento de um novo conjunto de dados. Pode-se subdividir esta tarefa em três principais: Estimação ou Regressão, Predição e Classificação.

- **Estimação ou Regressão** – Processo de prever algum valor, baseado em um valor já conhecido, o registro é identificado por um valor numérico e não um categórico. Um exemplo seria quando se conhece o padrão de despesas e idade de um determinado indivíduo e estima-se seu salário e número de filhos.
- **Predição** – Processo de prever um comportamento futuro, baseado em vários valores. Exemplos que se pode citar seriam prever o valor de uma ação três meses adiante ou prever o vencedor de um campeonato baseando-se na comparação das estatísticas dos times.
- **Classificação** – Visa identificar a qual classe determinado registro pertence. Nesta tarefa, o modelo analisa o conjunto de registros fornecidos, com cada registro já contendo a recomendação à qual classe pertence, aprendendo assim como classificar um novo registro (aprendizado supervisionado). É utilizada para variáveis

alvo discretas. Um exemplo de aplicabilidade seria determinar quando uma transação de crédito pode ser uma fraude.

6.2.2.2. Tarefas Descritivas

Objetiva derivar padrões (correlações, tendências, grupos, trajetórias e anomalias) que resumam os relacionamentos subjacentes nos dados. Esta tarefa é muito utilizada em conjunto com as técnicas de análise exploratória de dados, para então comprovar a influência de certas variáveis no resultado obtido. As análises subdividem-se em três principais segmentos:

- **Análise de Associação** – É utilizada para descobrir padrões que descrevam características associadas dentro dos dados. Os padrões descobertos são normalmente representados na forma de regras de implicação ou subconjuntos de características. Por conta do tamanho exponencial do espaço de busca, o objetivo é extrair os padrões mais interessantes de forma eficiente. Se aplica em casos que se deseja estudar preferências ou afinidades, exemplo disso é observar itens que mais saem juntos em um supermercado, como mostrado na Figura 6.2 leites e fraldas, e pode-se oferecer esses produtos juntos em combos, o que pode gerar uma oportunidade de venda cruzada.
- **Análise de Grupo** - Procura encontrar grupos de observações intimamente relacionados de modo que observações que pertençam ao mesmo grupo sejam mais semelhantes entre si do que as que pertençam a outro grupo. Essa tarefa se assemelha a tarefa de classificação, mas a diferença é que na classificação as classes são definidas de forma prévia e no agrupamento as classes são definidas durante a tarefa de acordo com o estabelecimento do conjunto de atributos. Um exemplo de aplicação seria segmentação de mercado para um nicho de produtos.
- **Detecção de Anomalias** – Tarefa de Identificar observações cujas características diferem expressivamente dos demais dados. Este algoritmo tem o objetivo de detectar anomalias e apresenta um baixo ou nulo índice de alarmes falsos, ou seja, considerar dados normais como anômalos. Aplicabilidade inclui detecção de fraudes e intromissões na rede.

6.2.3. Clusterização

A Clusterização de Dados ou Análise de Agrupamentos é uma técnica de mineração de dados multivariados que através de métodos numéricos e a partir somente das informações das variáveis de cada caso, tem por objetivo agrupar automaticamente por aprendizado não supervisionado os n casos da base de dados em k grupos, geralmente disjuntos denominados clusters ou agrupamentos, ou seja, propende a formar grupos de objetos ou

elementos mais homogêneos entre si. Pode ser estabelecido previamente um número de grupos a ser formado, ou então se pode admitir ao algoritmo de agrupamento uma livre associação de unidades, de forma que a quantidade de grupos resultante seja conhecida somente ao final do processo

Distinta do conceito de classificação, a Clusterização é uma técnica mais “primitiva” na qual nenhuma suposição é feita a respeito dos grupos. Ao contrário da classificação, a Clusterização não conta com classes predefinidas e exemplos de treinamento de classes rotuladas, sendo assim realiza uma forma de aprendizado não supervisionado.

A ideia básica é que elementos que compoñham um mesmo cluster devem apresentar alta similaridade, mas devem ser muito dissimilares de objetos de outros clusters. Em outras palavras, toda clusterização é feita com objetivo de maximizar a homogeneidade dentro de cada cluster e maximizar a heterogeneidade entre clusters. (Maxwell,2016; Amorim, 2006)

Os grupos podem ser de diversos tipos: *Hierárquico* versus *Particional*, *Exclusivo* versus *Difuso* ou *Completo* versus *Parcial*. E por sua vez os agrupamentos podem ser divididos como: *Bem Separados*, *Baseados em Protótipos*, *Baseados em Gráficos*, *Baseados em Densidade* ou *Propriedades Compartilhadas*.

Neste trabalho será dado uma atenção especial a técnica particional de agrupamento baseada em protótipos que tentam encontrar m número especificado pelo usuário de grupos (K), que são representados pelos seus centroides. A técnica utilizada para análise é a *K-Means*. (Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.1. K-Means

Esse algoritmo usa o conceito de centroide. Dado um conjunto de dados, o algoritmo seleciona de forma aleatória k registros, cada um representando um agrupamento. Para cada registro restante, é calculada a similaridade entre o registro analisado e o centro de cada agrupamento, comumente o protótipo calcula a média de um grupo de pontos para gerar o centroide. O objeto é inserido no agrupamento com a menor distância, ou seja, maior similaridade. O centro do cluster é recalculado a cada novo elemento inserido. Diferentes variações do k -means: implementando otimizações para escolha do valor do k , novas medidas de dissimilaridade e estratégias para o cálculo do centro do agrupamento. É a técnica mais utilizada para objetos em um espaço n -dimensional contínuo.

Uma variação bem conhecida do k -Means é o k -Medoid. Nesse caso, ao invés de calcular o centro do agrupamento através da média de distância dos registros, ele usa a moda. Este centro é o medóide que é o ponto mais representativo para um grupo de pontos, e diferentemente do centroide que nem sempre irá representar um ponto real de dados, o medóide deve ser um ponto verdadeiro nos dados. (Camilo *et al.*, 2009, Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.2. Algoritmo K-Means Básico

O k-means é o mais popular e mais simples algoritmo particional. K-means foi descoberto independentemente em diferentes campos científicos, primeiramente por H. Steinhaus (1956), S.P. Lloyd (1982) (proposto em 1957, mas publicado somente em 1982), Ball & Hall (1965) e J. Macqueen (1967) e mesmo tendo sido proposto há mais de 50 anos, ainda é um dos algoritmos mais usados para clusterização devido à facilidade de implementação, simplicidade, eficiência e sucesso empírico e possui várias extensões desenvolvidas em várias formas (Maxwell, 2016; Bock, 2008).

Os passos do algoritmo são os mostrados a seguir e exemplifica-se este processo através do fluxograma da Figura 6.3. (Torquato *et al.*, 2012; Dilly, 1999; Addrians *et al.*, 1996; Mannila, 1996)

1. Escolher K pontos, dentro do espaço de características, representando os centros dos K clusters que se deseja dividir o conjunto de dados;
2. Escolha K pontos iniciais para serem utilizados como estimativas dos centroides de acordo com a função de similaridade;
3. Examine cada ponto da série e coloque-o no cluster cujo centroide estiver mais próximo. O centroide é recalculado a cada novo dado inserido;
4. Repita o passo 2 até que não haja mudança no cluster ou atinja um critério de parada.

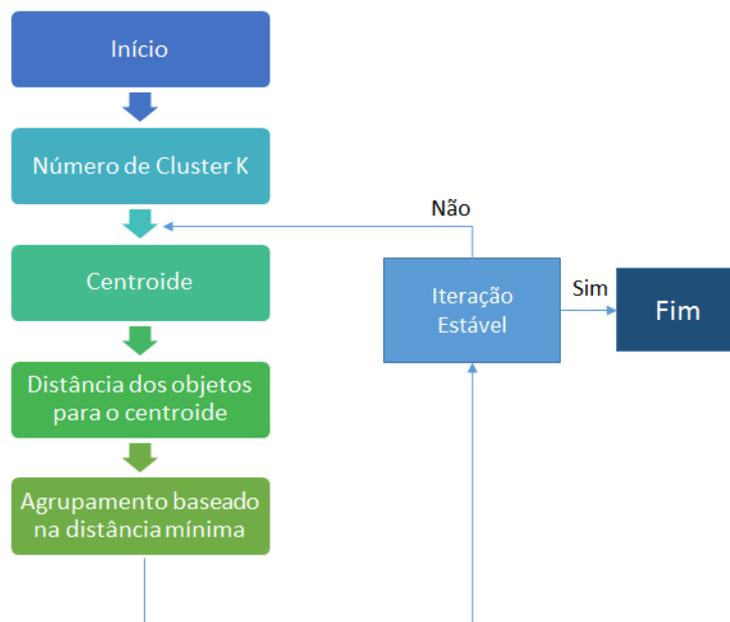


Figura 6.3 - Fluxograma Algoritmo K-Means
Adaptado: Teknomo, 2016

Inicialmente os pontos são atribuídos aos centroides iniciais, que estão no grupo maior de pontos, a média é utilizada como centroide neste caso apresentado por (Tan *et al.*, 2009). Quando os pontos são atribuídos a um centroide ele é atualizado. O passo seguinte

apresenta os pontos atribuídos aos centros atualizados e novamente os centroides são atualizados. Nos passos subsequentes que são mostrados na Figura 6.4(b), (c) e (d), respectivamente, dois dos centroides se movem para os dois grupos menores de pontos na parte inferior da imagem. Quando o algoritmo termina é porque não há mais mudanças, a iteração se estabilizou e os centroides identificaram os clusters naturais.

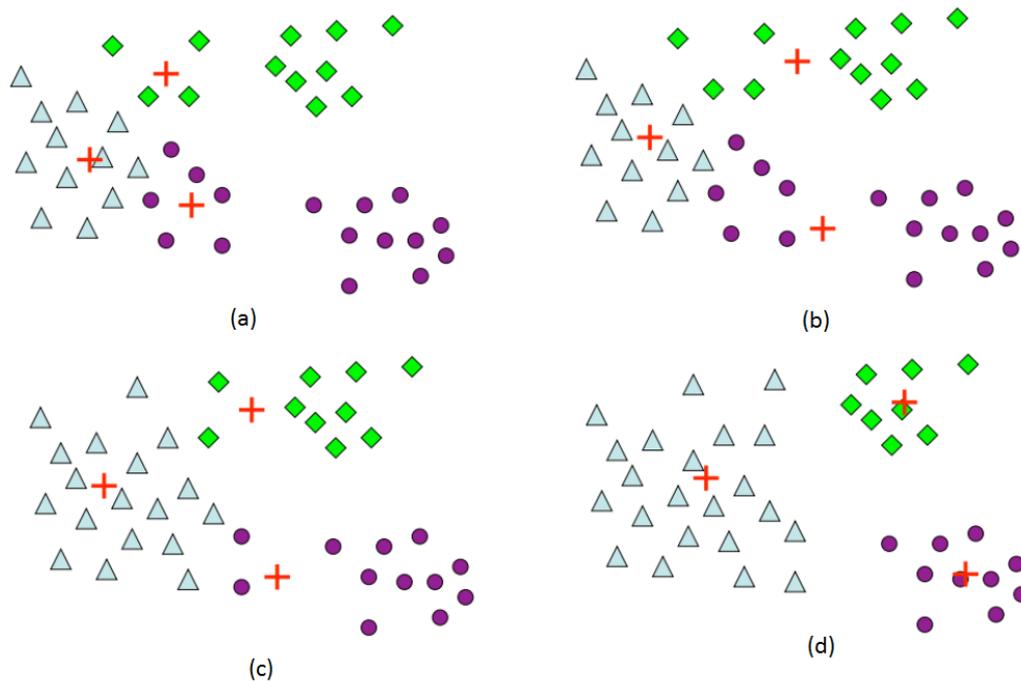


Figura 6.4 – Algoritmo K-Means para encontrar 3 grupos: (a)Seleciona os centroides e os grupos; (b) Recalcula os centroides; (c)Ajusta os grupos de acordo com o novo centroide; (d) Reajusta novamente os centroides e os grupos (final).

Fonte: Volpi, 2015

6.2.3.2.1. Atribuindo Pontos ao Centroide mais Próximo

Para atribuir um ponto ao centroide mais próximo é necessário ter uma noção de quão mais próximo esse ponto será. Exemplos para este cálculo são a distância Euclidiana (L_2) que é usada para pontos de dados no espaço Euclidiano ou a semelhança de cosseno que é mais apropriada para documentos.

A posição do centroide é modificada, para que este se aproxime ainda mais do ponto apresentado. Com o passar dos ciclos de treinamento, os centroides vão se movimentando pelo espaço e se posicionando nos “centros de massa” dos grupos de pontos que representam. Quando a condição de convergência enfim for satisfeita, ter-se-á que cada centroide representará uma classe no espaço de pontos.

Quando se trabalha com dados em um espaço euclidiano de baixa dimensionalidade é possível evitar o cálculo de muitas semelhanças, acelerando assim o processo do algoritmo do K-Means, outra forma de aceleração e consequentemente obtenção de resultados mais rápidos é dividir o K-Means ao meio. (Tan *et al.*, 2009; Prampetro *et al.*, 2012)

6.2.3.2.2. Centroides e Funções Objetivas

O objetivo do agrupamento é expresso por uma função objetivo, que depende das proximidades dos pontos entre si ou dos centroides do grupo, como minimizar a distância quadrada de cada ponto com seu centroide que se encontra mais próximo, este centroide em muitos casos pode vir a ser determinado matematicamente quando já se tem uma medida de proximidade e uma função objetivo. (Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.2.3. Dados em Espaço Euclidiano

Para a função objetivo, que mede a qualidade do *clustering*, usa-se a *soma do erro quadrado* (SSE). Calcula-se o erro de cada ponto de dados, ou seja, a distância Euclidiana até os centroides mais próximos e depois calcula-se a soma total dos erros quadráticos.

Com execuções diferentes do K-Means para dois conjuntos diferentes de grupos prefere-se o que apresentar taxa de erros menor, a SSE é definida como:

$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} dist(c_i, x)^2 \quad (6.1)$$

No qual:

K = Número de grupos;

C_i = O grupo de índice i;

x = Um objeto;

c_i = O centroide do grupo C_i ;

dist = Distância Euclidiana Padrão (L_2).

O centroide é dado pela equação 6.2.

$$c_i = \frac{1}{m_i} \sum_{x \in C_i} x \quad (6.2)$$

No qual:

C_i = O grupo de índice i;

x = Um objeto;

c_i = O centroide do grupo C_i ;

m_i = O número de objetos no grupo de índice i.

Os últimos passos do algoritmo K-Means tentam minimizar a SSE, formando grupos e atribuindo pontos ao seu centroide mais próximo e depois recalculando estes para que o valor de SSE decaia ainda mais. (Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.2.4. Dados de Documentos

Análise de dados dos documentos são apresentados como uma matriz de termos de documentos, por exemplo a medida de semelhança do coseno. O objetivo é maximizar as semelhanças dos documentos e/ou atributos em um grupo com o centroide do grupo, esta quantidade é tida como *coesão* do grupo. A quantidade análoga para a SSE total é a coesão total e é dada pela equação 6.3. (Tan *et al.*, 2009)

$$Coesão\ Total = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} \text{coseno}(x, c_i)^2 \quad (6.3)$$

6.2.3.2.5. Caso Geral

Várias possibilidades podem ser usadas para calcular a função de proximidade, centroide e função objetivo que podem ser usadas no algoritmo K-Means básico e tenderão a convergir. Na Tabela 6.1 são mostradas algumas dessas possíveis escolhas.

Tabela 6.1 – K-Means: Escolhas comuns para proximidade, centroides e funções objetivas		
Função de Proximidade	Centroide	Função Objetiva
Manhattan (L₁)	Mediana	Minimizar a soma da distância L ₁ , de um objeto ao seu centroide de grupo
Euclidiana Quadrática (L₂²)	Média	Minimizar a soma da distância L ₂ quadrática de um objeto ao seu centroide de grupo
Coseno	Média	Maximizar a soma da semelhança do coseno de um objeto ao seu centroide de grupo
Divergência de Bregman	Média	Maximizar a soma da Divergência de Bregman de um objeto ao seu centroide de grupo

Fonte: Tan *et al.*, 2009, pg.598

6.2.3.3. K-Means: Questões Adicionais

6.2.3.3.1. Grupos Vazios

Um dos problemas com o K-Means básico é que grupos vazios podem ser obtidos se nenhum ponto for designado a um grupo durante a etapa de atribuição. Portanto é necessário criar uma estratégia para substituir este centroide, pois se isso não ocorrer o SSE será bem maior. Um método é escolher o ponto que estiver mais distante de qualquer centroide corrente e se não houver mais nada então o problema que influenciaria diretamente no aumento da taxa de erro é sanado. Outra estratégia é escolher o centroide de substituição do grupo que possua maior SSE, isto dividiria o grupo e reduziria as SSE gerais do agrupamento. (Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.3.2. Elementos Externos

Quando o critério do erro quadrático é usado, elementos externos podem influenciar indevidamente os clusters que são encontrados. Tendo elementos externos presentes os centroides de grupos resultantes (protótipos) podem não ser tão representativos e conseqüentemente o SSE seria maior. Às vezes é útil detectar estes elementos previamente e eliminá-los, mas isto irá depender do objetivo final do uso do algoritmo. Identificar estes elementos nem sempre é trivial e várias técnicas podem ser utilizadas, dentre elas remoção destes elementos antes de agrupar ou excluir pequenos grupos formados durante o processamento. (Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.3.3. Reduzindo a SSE com Pós-Processamento

Um modo de reduzir a SSE é aumentando o número de grupos, ou seja, elevando o K. Outro modo para redução é “ajustar” os clusters obtidos para que o agrupamento apresente um SSE menor, a estratégia nesse caso é focar grupos individuais, pois a SSE total é a soma da SSE de cada grupo. Essa operação pode ser feita dividindo ou fundindo grupos. (Tan *et al.*, 2009)

Dois estratégias que diminuem a SSE total aumentando o número de grupos são:

- **Dividir um grupo** – O grupo com maior SSE pode ser escolhido ou o que apresentar o maior desvio padrão para um atributo.
- **Introduzir um novo centroide no grupo** – O ponto que está mais longe de qualquer centro de grupo é escolhido ou escolhe-se aleatoriamente entre todos os pontos ou pontos com maior SSE.

Dois estratégias que diminuem o número de grupos, enquanto tenta minimizar a SSE total são:

- **Dispersar um grupo** – Remove-se o centroide que corresponda ao grupo e distribui-se os pontos a outros grupos. O grupo que será disperso deve ser o que aumentar ao máximo a SSE total.
- **Fundir dois grupos** – Grupos com centroides mais próximos são escolhidos ou aqueles que na união ocasionem o menor aumento na SSE total.

6.2.3.3.4. Atualizando Centroides Incrementalmente

Em vez de atualizações dos centroides ocorrerem após o processamento de todos os pontos, estes podem ser atualizados Incrementalmente depois de cada atribuição de um ponto a um grupo. Isto requer zero ou duas atualizações nos centroides de grupos em cada

etapa, já que um ponto se move para um novo grupo (duas atualizações) ou permanece no grupo que está (zero atualizações) e isto garante que grupos vazios não surjam.

Se esta estratégia for utilizada o peso relativo do ponto sendo adicionado pode ser ajustado; isto pode apresentar maior precisão e convergência, mas pode dificultar uma boa escolha para o peso relativo.

Um ponto positivo desta técnica por exemplo é que possuindo uma função objetivo é possível processar um ponto individual, calculando o valor da função objetivo para cada atribuição possível de grupos.

O lado negativo é que incrementar centroides nas atualizações introduz uma dependência de ordem, ou seja, os grupos produzidos podem depender da ordem na qual os pontos são processados. (Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.4. Dividindo K-Means

É uma extensão do K-means básico que tem o princípio de dividir grupos, para produzir novos grupos, ou seja, para se obter K grupos divide-se o conjunto de todos os pontos em dois grupos, escolhe-se um destes grupos e divide-se em dois e assim consecutivamente até que se tenha o número de K desejado. O algoritmo é exemplificado abaixo:

1. Inicializar a lista de grupos para que contenham o grupo consistindo de todos os pontos;
2. *Repetir*;
3. Remover um grupo da lista de grupos;
4. {Executar diversas divisões “de teste” dos grupos escolhidos;
5. *Para* $i=1$ até o número de testes *fazer*
6. Divide-se o grupo selecionado usando K-Means básico.
7. *Fim do para*;
8. Adicionar estes dois grupos da divisão com a menor SSE total.
9. Adicionar estes dois grupos à lista de grupos;
10. *Até que* a lista de grupos contenha K grupos.

A escolha do grupo pode ser feita por vários critérios, seja por maior grupo por etapa ou maior SSE ou mesmo combinação destes fatores, as possibilidades são inúmeras. (Tan *et al.*, 2009)

6.2.3.5. Pontos Fortes e Fracos

O K-means é simples e pode ser usado para uma ampla variedade de tipos de dados, é muito eficiente apesar das múltiplas execuções que devem ser realizadas frequentemente e suas variações como a divisão de k-means são ainda mais eficientes.

No entanto nem para todos os tipos de dados ele pode ser aplicável. Ele não lida bem com grupos não globulares ou de tamanhos e densidades diferentes, mas consegue gerar subgrupos puros se um número significativo de grupos for especificado. A detecção e remoção de elementos externos podem auxiliar com este impasse. O K-means é restrito a dados para os quais existia uma noção de um centro.

O algoritmo do k-means exige que as variáveis sejam numéricas ou binárias e frequentemente aplicações envolvem dados categorizados, neste caso, uma alternativa é converter os dados categorizados em valores numéricos ou utilizar uma das muitas variações do método e ele é sensível a valores outliers Um único objeto com valor muito extremo pode modificar, substancialmente, a distribuição dos dados. (Tan *et al.*, 2009; Prass, 2013)

6.3. ÁRVORE DE DECISÃO (DECISION TREE)

Árvores de decisão (*Decision Trees (DTs)*) são ferramentas que podem ser utilizadas para dar ao agente a capacidade de aprender, bem como para tomar decisões. Aprendizado de árvores de decisão é um exemplo de aprendizado indutivo: Cria uma hipótese baseada em instâncias particulares que gera conclusões gerais.

Árvores de decisão são similares a regras if-then. É uma composição muito usada na implementação de sistemas especialistas e em problemas de classificação. As árvores de decisão tomam como entrada uma ocorrência descrita por um conjunto de atributos e retorna uma decisão, que é o valor previsto para o valor de entrada. Os atributos de entrada podem ser discretos ou contínuos. (Pozzer, 2006)

As árvores de decisão são construídas baseadas no modelo hierárquico *top-down*, isto é, do nó raiz em direção às folhas. Mesmo havendo diferenças na forma de realizar as etapas os algoritmos utilizam a técnica dividir para conquistar. Esta técnica está baseada nas consecutivas divisões do problema estudado em vários subproblemas de menores dimensões, até que seja encontrada uma solução mais simples para cada um dos problemas. (Oliveira, 2013).

Utilização de árvores de decisão remetem a meados da década de 50. Em 1966 Hunt e colegas em psicologia utilizaram métodos de busca exaustiva em DTs para modelar o aprendizado de conceitos humanos. Em 1977 Breiman, Friedman e colegas em estatística desenvolveram *Classification and Regression Trees (CART)* e em 1979 houve a publicação do primeiro trabalho de Quinlan com proto-ID3 (*Induction of Decision Trees*). Na década de 80, em especial 1984, ocorreu a publicação em massa do software CART e dois anos depois sai o artigo de Quinlan sobre ID3, nesta década ainda teve-se diversas melhorias como tratamento de ruídos, atributos contínuos e árvores oblíquas. E na década de 90 houve atualização do algoritmo de Quinlan o C4.5 e houve um poder maior sobre esta

ferramenta, heurística de controle de overfitting (C5.0), combinação de DTs, etc. (Baranauskas, 2011)

6.3.1. Funcionamento de uma Árvore de Decisão

Para compreender de forma simples o funcionamento de uma árvore de decisão, (Tan *et al*, 2009) dá um exemplo no qual trata sobre a classificação de vertebrados em duas categorias mamíferos e não mamíferos.

Supõe-se que uma nova espécie é encontrada por cientistas e a questão que se estabelece é como saber em qual grupo se encaixaria esta espécie. Então algumas questões podem vir a ser levantadas como: a temperatura do sangue do animal (frio ou quente) ou se as fêmeas geram seus filhotes. Esta série de questões e as devidas respostas podem ser organizadas na forma de uma árvore de decisão, com sua estrutura hierárquica possuindo nodos e arestas direcionais. Na Figura 6.5 é exemplificado este caso.

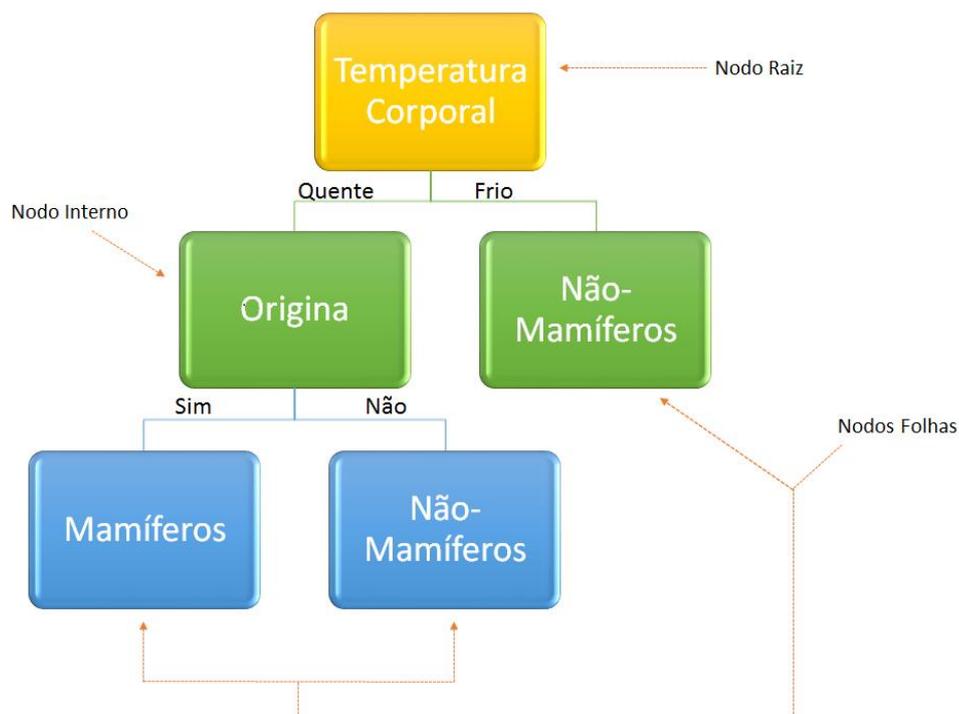


Figura 6.5 – Uma árvore de decisão para o problema de classificação de mamíferos
Adaptado: Tan *et al*, 2009, pg.178

A árvore possui suas partes divididas em:

- **Nó Raiz** – Não possui arestas chegando em zero ou mais arestas saindo.
- **Nós Internos** – Cada um dos quais possuindo exatamente uma aresta chegando e duas ou mais saindo.
- **Nó Folha** ou **Terminal** – cada um dos quais possuindo uma aresta chegando e nenhuma saindo.
- **Ramos** - Ligações entre os nós.

Na árvore de decisão, cada nó folha recebe um rótulo de classe. Os *nós não terminais*, que incluem o nó raiz e os nós internos, contêm condições de testes de atributos para separar registros que possuam características distintas, no caso do exemplo citado os atributos utilizados foram a temperatura corporal e se o animal gera ou não seu filhote.

Classificar um registro de testes é direto quando a árvore de decisão está estabelecida. Iniciando do nó raiz, aplica-se a condição de teste ao registro e segue-se a ramificação apropriada baseada no resultado do teste. O que levará a outro nó interno, que levará a uma nova condição de teste, ou a um nó folha. O rótulo da classe atribuído ao nó folha é então registrado. Na Figura 6.6 é mostrado o caminho da árvore de decisão que é utilizada para prever o rótulo da classe de um flamingo, O caminho terminará em um nó folha intitulado Não-Mamíferos, as linhas tracejadas representam, o resultado da aplicação de várias condições de testes sobre atributos sobre o animal não rotulado. (Tan *et al.*, 2009)

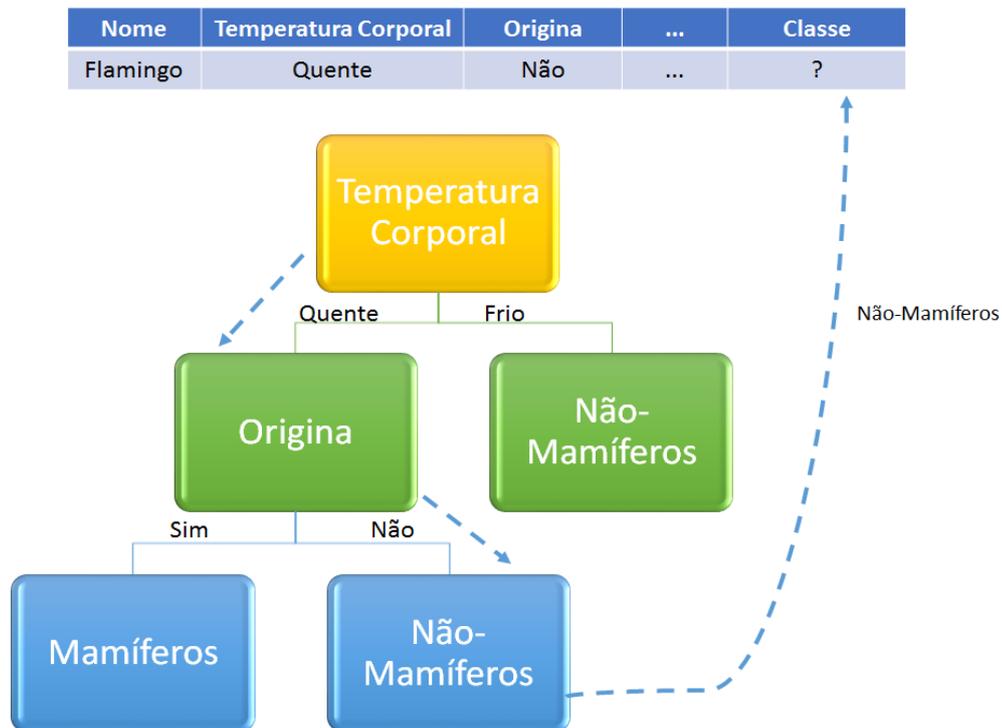


Figura 6.6 – Classificando um vertebrado sem rótulo.
Adaptado: Tan *et al.*, 2009, pg. 179

6.3.2. Construção de uma Árvore de Decisão

Árvores de Decisão podem ser arquitetadas a partir de um conjunto de atributos, este processo é dado o nome de indução de árvores de decisão, obviamente há árvores com maior precisão que outras, mas achar a árvore no estado ótimo é impraticável computacionalmente por conta do tamanho exponencial do espaço de pesquisa. No entanto novos algoritmos continuam surgindo com o intuito de que as árvores sejam razoavelmente precisas em um tempo aceitável, estes usualmente utilizam a estratégia de crescimento da

árvore de decisão através de decisões localmente ótimas sobre cada atributo que será utilizado para particionar dados. Um destes é o *algoritmo Hunt*, o qual é base para outros algoritmos de indução como ID3, C4.5 e CART. (Tan *et al.*, 2009)

O processo de indução de árvores de decisão tem a função de particionar recursivamente um conjunto de treinamento até que cada subconjunto obtido deste particionamento contenha casos de uma única classe. Uma árvore de decisão toma como entrada um objeto ou situação descrito por um conjunto de atributos e retorna uma decisão - o valor de saída previsto, de acordo com a entrada. A partição é determinada relacionando uma avaliação que tenha um pequeno conjunto de saídas, criando uma ligação para cada uma possível, passando cada exemplo para sua correspondente ligação e tratando cada bloco de partição como um subproblema para o qual uma subárvore é construída recursivamente. Como critério de parada é comum adotar quando todos os exemplos de uma ligação pertencem a uma mesma classe. (Halmenschlager, 2002; Barbosa *et al.*, 2012; Oliveira, 2013)

O processo de indução de árvores de decisão é conseguido pela estratégia *Top Down Induction of Decision Trees (TDIDT)*, ou apenas *Top-Down*, ou seja, a árvore se inicia pela raiz e continua pelos nós até atingir as folhas e pode ser demonstrada de duas formas (Halmenschlager, 2002):

- **Por Profundidade** – Dado um nodo inicial, é aplicado um operador (ligação) para chegar a um novo nodo. Se não for uma folha, é realizada uma nova ligação e um novo nó, desta forma consecutivamente. Se uma folha for incluída então ocorre um recuo, retornando assim ao nó pai da folha e adiciona-se um novo operador e um novo nó. Caso não seja possível adicionar um novo nó, é retornado até o nó que permita incluir uma nova ligação. O término ocorre quando nenhum nó puder ser encontrado. Exemplifica-se na Figura 6.7 (a) a ordem de inclusão dos nós.
- **Por Largura** - Aplica-se todas as ligações de um nodo, chegando a novos nós. Para cada nó resultante, é testado o critério de término, adicionando a sua folha a novos nós. Não usa *backtracking*, pois não há retorno ao nó pai. Exemplifica-se na Figura 6.7 (b) a ordem de inclusão dos nós.

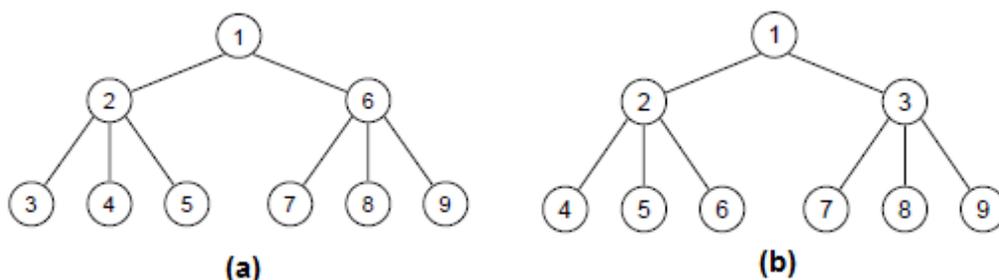


Figura 6.7 – (a) Indução por profundidade, (b) Indução por largura
Fonte: Halmenschlager, 2002, pg. 35

6.3.3. Métodos para Expressar Condições de Teste de Atributos

Algoritmos de indução de árvores de decisão devem estabelecer métodos para criar condições de testes de atributos e seus resultados de acordo com o tipo de atributo escolhido. Basicamente há 4 tipos: Binários, Nominais, Ordinais e Contínuos e são exemplificados na Figura 6.8. (Tan *et al.*, 2009)

- **Atributos Binários** – A condição de teste para um atributo binário gera dois resultados possíveis.
- **Atributos Nominais** – Pode ter vários valores e pode ser expresso de dois modos: Divisão Múltipla ou Divisão Binária. A primeira estabelece que o número de resultados depende do número de valores distintos para o atributo correspondente e na binária há o agrupamento de valores de atributos em dois subconjuntos.
- **Atributos Ordinais** – Produzem divisões binárias ou múltiplas. Valores de atributos podem ser agrupados desde que o agrupamento não viole as propriedades de ordenação dos valores dos atributos.
- **Atributos Contínuos** – A condição de teste pode ser expressa como um teste de comparação ($A > v$) ou ($A \leq v$) com resultados binários ou uma faixa com resultados na forma de $v_i \leq A \leq v_{i+1}$.

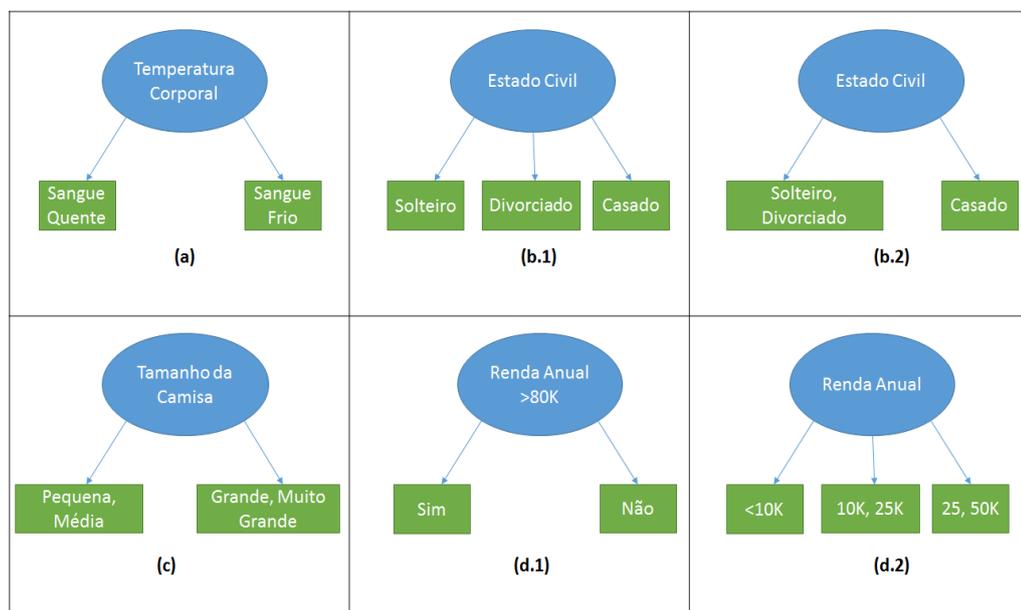


Figura 6.8 – Condição de teste para atributos: (a) Binários; (b.1) Nominais-Divisão Binária; (b.2) Nominais- Divisão Múltipla; (c) Ordinais; (d.1) Contínuos-Comparação; (d.2) Contínuos-Faixa. Adaptado: Tan *et al.*, 2009, pg.184-186

6.3.4. Métricas para Selecionar a Melhor Divisão

Existe vários métodos para determinar a melhor forma de dividir os registros. As métricas são definidas em termos de distribuição da classe dos registros antes e depois da divisão, Este critério verifica cada atributo candidato e seleciona aquele que maximiza (ou minimiza) alguma função heurística sobre os subconjuntos.

Supõe-se que $k(i|t)$ denote a fração de registros que pertencem à classe i em um determinado nó t . Pode-se omitir a referência ao nó t e expressar a fração como p_i . Em um problema com duas classes, a distribuição das mesmas em qualquer nó pode ser escrita como (p_0, p_1) , onde $p_1=1-p_0$.

As métricas desenvolvidas para selecionar a melhor divisão são na maioria dos casos embasadas no grau de impureza dos nodos filhos. Quanto menor o grau de impureza, mais distorcida é a distribuição de classes. Um nó com distribuição de classe $(0,1)$ possui impureza zero, mas um nó com distribuição de classes uniforme $(0.5, 0.5)$ possui impureza maior. Algumas métricas de impureza utilizadas são (Tan *et al*, 2009; Oliveira, 2013):

$$Entropia(t) = - \sum_{i=0}^{c-1} p(i|t) \log_2 p(i|t) \quad (6.4)$$

$$Gini(t) = 1 - \sum_{i=0}^{c-1} [p(i|t)]^2 \quad (6.5)$$

$$Erro da Classificação Errada(t) = 1 - \max[p(i|t)] \quad (6.6)$$

6.3.4.1. Entropia

O critério de ganho de informação está fundamentado em uma medida conhecida como *Entropia da Informação de Shannon*.

A entropia pode ser definida como a medida de informação calculada pelas probabilidades de ocorrência de eventos combinados ou individuais. Pode-se afirmar que a entropia é uma medida do grau de impureza em um conjunto arbitrário de amostras, ou seja, é a medida da desordem de um conjunto de amostras. O critério da entropia mede a quantidade de informação necessária para codificar a classe do nó. Dado um atributo classe A , de um conjunto de amostras S , em que A pode assumir v_i valores de classes diferentes, então a entropia de A relativa a esta classificação é definida como (Oliveira, 2013):

$$Entropia(A) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i \quad (6.7)$$

No qual m é o número total de classes e $p_i=p(A=v_i)$ é a probabilidade do atributo classe A ser igual à classe cujo índice é i , isto é, a proporção do número de amostras com valor v_i em relação ao número total de amostras de S .

Quanto maior a entropia de um atributo, mais uniforme é a distribuição dos seus valores. Entropia igual à zero significa que ocorreu apenas uma classe no conjunto de dados, e será igual a um se o número de amostras de cada classe for igual. Para uma entropia próxima de zero, indica que as classes são pouco uniformes.

A construção de uma árvore de decisão visa reduzir o valor da entropia. A medida do ganho de informação representa a redução esperada na entropia de um atributo preditivo,

considerando que o atributo classe já foi determinado. No processo de construção da árvore, o atributo que possuir o maior ganho de informação deve ser colocado como nó raiz da árvore, pois será este atributo que fornecerá a maior redução na entropia, possibilitando a classificação dos dados de forma mais rápida.

Para poder determinar o valor do ganho de informação devem ser realizados os seguintes cálculos:

- Calcular a entropia conjunta, isto é, para todo o conjunto de dados;
- Calcular a entropia individual para cada atributo do conjunto de dados.

Considere um conjunto de amostras, contendo um atributo classe definido como A e um dos atributos preditivos definido como B . O ganho de informação (GI) do atributo preditivo B é definido como sendo a diferença entre a entropia do atributo classe A ($Entropia(A)$) menos a entropia condicional do atributo preditivo B , tendo sido definido o valor do atributo classe A ($Entropia(B|A)$). O ganho de informação será dado pela equação 6.8.

$$GI(B, A) = Entropia(A) - Entropia(B|A) \quad (6.8)$$

Onde o segundo termo da equação é a entropia condicional, definida como a entropia de um atributo preditivo B , sendo conhecido o atributo classe A , é dada por:

$$Entropia(B|A) = - \sum_{i=1}^m p_i \cdot Entropia(B|A = v_i) \quad (6.9)$$

Onde m é o número total de classes do conjunto de amostras, B é o atributo preditivo que está sendo considerado. A é o atributo classe assumindo o valor v_i . O termo $Entropia(B|A=v_i)$ é a entropia do atributo preditivo B sendo dado o valor do atributo classe $A=v_i$.

$$Entropia(B|A = v_i) = - \sum_{i=1}^m p(B|A = v_i) \log_2 p(B|A = v_i) \quad (6.10)$$

Onde m é o número de classes que o atributo classe A pode assumir, $p(B|A=v_i)$ é a probabilidade condicional do atributo B , isto é, a proporção dada pela razão entre o número de exemplos de B com $A=v_i$ e o número total de amostras na classe $A=v_i$ (Oliveira, 2015).

6.3.4.2. Gini

Outro método desenvolvido foi o $GINI$, por Breiman, (1984) que visa minimizar a impureza de cada nó. Onde a impureza do nó é máxima quando todas as classes possuem igual distribuição e mínima quando existe apenas uma classe. Considerando um conjunto de dados S , que contém n registros, cada um com uma classe A , o índice Gini de S é dado pela equação (6.11) (Oliveira, 2013).

$$Gini(S) = 1 - \sum_{i=1}^m p_i \left[\frac{A_i}{n} \right]^2 \quad (6.11)$$

No qual:

p_i = é a probabilidade relativa da classe A em S .

n = é o número de registros em S .

m = é o número de classes.

Se S for particionado em dois subconjuntos S_1 e S_2 , um para cada ligação, o índice Gini dos dados particionados será dado pela equação (6.12),

$$Gini(S|A) = \frac{n_1}{n} Gini(S_1) + \frac{n_2}{n} Gini(S_2) \quad (6.12)$$

No qual:

n_1 = é o número de exemplos de S_1 .

n_2 = é o número de exemplos de S_2 .

6.3.4.3. Erro da Classificação Errada

Por fim o método de divisão pelo erro de classificação, baseia-se em reduzir o erro de classificação por folha, levando em conta a probabilidade de ocorrência do registro para a classe e foi apresentada na equação (5.6) (Tan *et al.*, 2009, Oliveira, 2013).

6.3.5. Algoritmo da Árvore de Decisão

A entrada desse algoritmo consiste dos registros de treinamento E e o conjunto de atributos F . O algoritmo funciona selecionando recursivamente o melhor atributo para dividir os dados (Passo 7) e expandir os nodos folha da árvore (Passos 11 e 12) até que o critério de parada seja satisfeito (Passo 1). Abaixo detalha-se este algoritmo (Tan *et al.*, 2009):

CrescimentoDaÁrvore (E, F)

1. **se** cond_parada(E, F) = verdadeiro **then**
2. *folha* = criarNodo();
3. *folha.rótulo* = Classificar(E)
4. retorna *folha*.
5. **senão**
6. *raiz* = criarNodo().
7. *raiz.cond_teste* = encontrar_melhor_divisão(E, F).
8. atribuir $V = \{v | v \text{ é um resultado possível de } raiz.cond_teste\}$.
9. **para** cada $v \in V$ **faça**
10. $E_v = \{e | raiz.cond_teste(e) = v \text{ e } e \in E\}$.
11. *filho* = *CrescimentodaÁrvore*(E_v, F).
12. adicionar *filho* como descendente de *raiz* e rotule o limite (*raiz* » *filho*) como v .
13. **fim do para**
14. **fim se**
15. retornar *raiz*.

A estrutura de algoritmo de indução de árvore de decisão chamado *CrescimentoDaÁrvore* é apresentado a seguir:

- A função `criarNodo()` estende a árvore de decisão criando um novo nodo. Um nodo na árvore de decisão possui uma condição de teste, denotada como `nodo.cond_teste`, ou um rótulo de classe, denotado como `nó.rótulo`.
- A função `encontrar_melhor_divisão()` determina qual atributo deve ser selecionado como condição de teste para dividir os registros de treinamento. A escolha da condição de teste depende de qual medida de impureza é usada para determinar a qualidade de uma divisão. Algumas medidas amplamente usadas incluem a entropia, índice Gini e a estatística X^2 .
- A função `Classifica()` determina o rótulo de classe a ser atribuído a um nó folha. Para cada nó folha t , $p(i|t)$ denota a fração de registros de treinamento da classe i associado ao nó t .
- A função `cond_parada()` é usada para determinar o processo de crescimento da árvore testando se todos os registros possuem ou o mesmo rótulo de classe ou os mesmos valores de atributos. Outro modo de teste é averiguar se o número de registros está abaixo de algum ponto limite mínimo.

Após a construção da árvore, um passo de **poda da árvore** pode ser realizado para reduzir o tamanho da árvore de decisão, pois árvores grandes demais podem ser vítimas de um fenômeno chamado **overfitting** (transbordamento). A poda auxilia a retirada de ramificações da árvore inicial ocasionando em melhora na capacidade de generalização da árvore de decisão (Tan *et al*, 2009).

Alguns tipos de algoritmos foram citados ao longo deste trabalho, mas se focará no CART, pois foi o utilizado na pesquisa que será apresentada no capítulo seguinte.

O algoritmo CART – *Classification And Regression Trees* foi apresentado em 1984 e é um dos mais difundidos. É um algoritmo paramétrico e possui grande capacidade de pesquisa de relações entre os dados, prevendo o tratamento de variáveis dependentes discretas (classificação) ou de variáveis contínuas (regressão).

A indução é feita por *top-down* automaticamente, a intervenção humana é mínima. Se baseia em um arquivo de treinamento com dados previamente rotulados e constrói uma árvore de decisão, particionando em duas ligações cada nodo, função de apenas um atributo, e separando os registros de cada partição.

O atributo a ser particionado é escolhido como aquele que gera grupos com a menor diversidade. Processo é aplicado recursivamente a cada subconjunto gerado até que não seja mais possível particionar, e cada registro do conjunto é atribuído a uma folha da árvore de decisão.

O resultado obtido do CART é a geração de uma árvore de decisão binária univariada, de grande simplicidade e legibilidade, que pode ser percorrida da raiz até as folhas através de testes do tipo “sim/não”, e pode-se verificar a classe e a taxa de erro de cada folha. (Halmenschlager, 2002, Zuben *et al.*, 2010)

Os critérios utilizados pelo CART são de acordo com (Halmenschlager, 2002; Fonseca, 1994):

- **Eleição do melhor atributo:** base no critério de Gini, entropia ou paridade;
- **Tratamento de atributos discretos:** cria dois subconjuntos através da criação de nodos binários;
- **Tratamento de atributos contínuos:** usa combinação linear para particionar nodos contínuos;
- **Tratamento de valores desconhecidos:** Usa estratégia *surrogate splits*;
- **Determinação da classe associada à folha:** efetuada pela atribuição da classe mais provável ou minimização de custos;
- **Método de poda:** efetua a poda por redução do fator custo-complexidade.

6.4. ESTIMAÇÃO DO ERRO DO CLASSIFICADOR

Para que o resultado da mineração de dados possa ser seguro é necessário a criação de um classificador e assim tentar obter o menor erro possível de classificação. Utilizam-se métricas de avaliação para estimar esse valor com base nos dados do conjunto de treinamento ou dados ainda não mostrados. É de fundamental importância estimar a qualidade do classificador utilizado, na forma de percentual de erro do modelo gerado. Pode-se definir o erro de um classificador como sendo (Halmenschlager, 2002, Oliveira 2013)

$$P_{e\%} = \frac{N_{erros}}{N_{casos}} \quad (6.13)$$

No qual:

$P_{e\%}$ é o percentual de erro;

N_{erros} é o número de casos classificados erroneamente;

N_{casos} é o número total de casos testados.

Uma importante ferramenta para a análise de desempenho de um classificador é a chamada de matriz de confusão, Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Matriz de Confusão

Matriz Confusão		Classe Real	
		Seguro	Inseguro
Classe Predita	Seguro	PV	PF
	Inseguro	NF	NV

Adaptado: Rodrigues, 2014, pg. 63

A matriz de confusão é uma matriz que contém os dados dos testes realizados no modelo induzido, tais como (Rodrigues, 2014; Oliveira, 2015):

- Positivo Verdadeiro (PV): Casos determinados como *seguros* que são verdadeiramente *seguros*.
- Positivo Falso (PF): Casos que são *seguros* que são *inseguros*.
- Negativo Verdadeiro (NV): Casos que são *inseguros* e são verdadeiramente *inseguros*.
- Negativo Falso (NF): Casos *inseguros* que são *seguros*.

A partir da matriz de confusão é possível calcular alguns índices de desempenho para o classificador, estes são (Oliveira, 2013; Rodrigues, 2014):

- **Taxa de acerto:** é a relação entre os casos classificados corretamente para qualquer classe com relação aos casos existentes;

$$P_{a\%} = \frac{PV + NV}{PV + PF + NV + NF} \quad (6.14)$$

- **Precisão de classe:** é a relação entre os casos classificados corretamente para uma classe com relação a todos os que foram classificados para esta classe;

$$P_{c\%} = \frac{PV}{PV + PF} \quad (6.15)$$

- **Taxa de Cobertura:** é a relação entre os casos classificados corretamente para uma classe com relação a todos os casos que deveriam ser classificados para esta classe;

$$P_{s\%} = \frac{PV}{PV + NV} \quad (6.16)$$

6.5. VALIDAÇÃO CRUZADA (CROSS VALIDATION)

Tipicamente em um processo de aprendizagem supervisionada em mineração de dados, após o pré-processamento e a formatação, os dados são fragmentados em dois subconjuntos, denominados base de treinamento e base de testes. Numa primeira etapa um algoritmo de indução de conhecimento é aplicado à base de treinamento. Com isso se obtém um modelo “treinado”, que representa o conhecimento extraído. Numa segunda etapa o modelo obtido é aplicado ao fragmento da base de dados denominado base de testes. Como a base de testes também é previamente rotulada, se pode medir a taxa de acerto do modelo, comparando-se o resultado obtido com a rotulação disponível na base de dados.

A técnica de Validação Cruzada consiste em dividir a base de dados em k partes (folds). Destas, k-1 partes são utilizadas para o treinamento e uma serve como base de testes. O processo é repetido k vezes, de forma que cada parte seja usada uma vez como conjunto de testes. Ao final, a correção total é calculada pela média dos resultados obtidos em cada

etapa, obtendo-se assim uma estimativa da qualidade do modelo de conhecimento gerado e permitindo análises estatísticas.

É um dos algoritmos mais utilizados para conjuntos de dados que não possuem muitos exemplos. Ele consiste em usar os mesmos dados, de forma repetida, porém divididos de forma diferente, ou seja, o conjunto de dados é dividido aleatoriamente em k partições mutuamente exclusivas (*folds*) de tamanho aproximadamente igual (n/k), exemplo é apresentado na Figura 6.9. (Oliveira,2013; Mikami *et al.*, 2009)

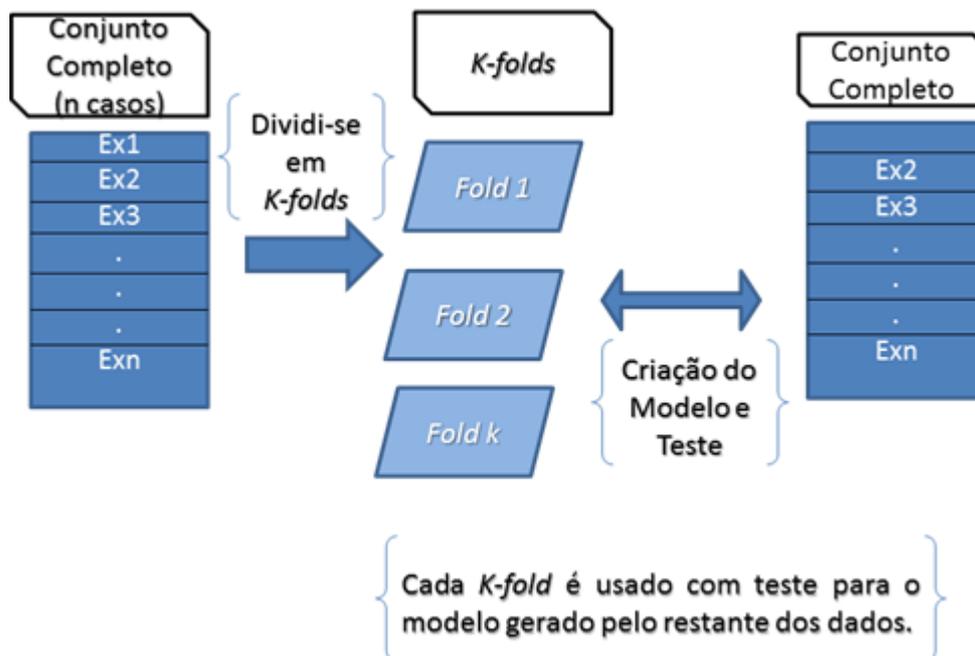


Figura 6.9 – Exemplo de Avaliação Cruzada
Fonte: Oliveira, 2013, pg. 40

A estimativa do erro verdadeiro é obtida como a média dos erros de cada experiência, equação 6.17:

$$E = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k E_i \quad (6.17)$$

6.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Técnicas de mineração de dados tem se mostrado muito benéficas, pois através delas é possível extrair informações úteis de arquivos brutos criando assim novas linhas de análise e agilidade em muitos processos que seriam inviáveis realizados manualmente e ajudam em tomadas de decisão.

Como mostrado muitas técnicas foram utilizadas para extrair informações e padrões de descargas parciais e maioria obteve resultados satisfatórios, mas observa-se que maioria dos artigos citados não chega nem a mencionar medições em geradores, o que foi uma das motivações para iniciar este trabalho, pois não foi encontrado referências no uso de

mineração de dados para classificar e determinar automaticamente tipos de descargas parciais em hidrogeradores de alta potência.

CAPÍTULO 07 – RESULTADOS

7.1. INTRODUÇÃO

Especialistas no mundo todo investigam métodos para detecção, classificação e localização de descargas parciais por pelo menos 60 anos, mas até hoje nunca houve um método universal estabelecido para este princípio. Mesmo no futuro não se sabe se isto será possível em decorrência da complexidade e particularidades da isolação elétrica de cada máquina, mesmo que estas venham a ser de mesmo fabricante, ainda assim acabam sendo diferentes em operação. (Babnik, *et al.*, 2007)

Com o aumento no volume de medições realizados na Usina Hidrelétrica de Tucuruí, principalmente devido ao uso do sistema do IMA-DP Intensivo, começou-se a ter dificuldades para analisar os dados brutos manualmente e extrair informações úteis e precisas para emissão de diagnósticos; então a utilização da mineração de dados vem a ser uma solução deste problema enfrentado.

Neste capítulo se apresentará a metodologia e os resultados deste trabalho que tem por objetivo principal estabelecer métodos de diagnóstico de falhas incipientes nos enrolamentos do estator, com base nos tipos e magnitudes das descargas parciais, utilizando as técnicas de mineração de dados.

No desenvolvimento dos procedimentos aqui propostos, serão utilizadas as normas e os padrões de descarga já pré-determinados em norma, e que foram apresentados no capítulo 03, bem como as medições realizadas nas máquinas das casas de força I e II da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, as quais foram obtidas pelo sistema do IMA-DP de medição de descargas parciais, sistema este desenvolvido pelo CEPEL.

Apesar de o método de medição das descargas parciais ser consolidado, os diagnósticos apresentados a respeito da isolação do estator tem sua fundamentação bastante empírica, ou seja, necessita-se de um especialista para analisar todos os gráficos obtidos para determinar em quais padrões cada descarga se encaixaria e qual a gravidade da mesma naquele equipamento, o que conseqüentemente torna-se algo demorado e sem uma segurança total nas análises apresentadas.

Em virtude desta realidade utilizou-se técnicas de mineração de dados, que tem o intuito de criar uma ferramenta inteligente de reconhecimento de padrões de descarga parcial. Após treinadas, as ferramentas baseadas em inteligência computacional poderão ser utilizadas para gerar diagnósticos para qualquer outra máquina com características similares, tornando as análises menos onerosas, mais ágeis e simples. Será apresentada uma abordagem baseada em clusterização e arvores de decisão, afim de agrupar e classificar os padrões de descargas, de maneira ágil e confiável, utilizando dados reais de

DPs. Tal proposta se mostrou uma alternativa viável, com bons resultados e de implementação sem grandes dificuldades.

7.2. RAPIDMINER

O *RapidMiner* é uma ferramenta executada em Java, *open-source*, que fornece a implementação de algoritmos utilizados em problemas de aprendizagem de máquina e uma interface gráfica para o desenvolvimento rápido de projetos para a criação de modelos preditivos. Utilizando-se este software é possível definir um processo de tratamento de dados, inserindo operadores responsáveis por: entrada e saída; algoritmos de aprendizagem (supervisionados ou não); funções de *on-line analytical processing*; pré-processamento; validação, e; visualização. Para este trabalho utilizou-se a versão 5.0 do software.

A ferramenta *RapidMiner* fornece uma interface gráfica onde o processo de tratamento dos dados pode ser definido inserindo os operadores dentro de um fluxo organizado por vários blocos, mostrado na parte central da figura 7.1. Os operadores que podem ser inseridos no processo estão disponíveis do lado esquerdo da interface e quando um item é selecionado os detalhes da configuração do respectivo operador são apresentados do lado direito (Oliveira, 2013; Barth, 2006).

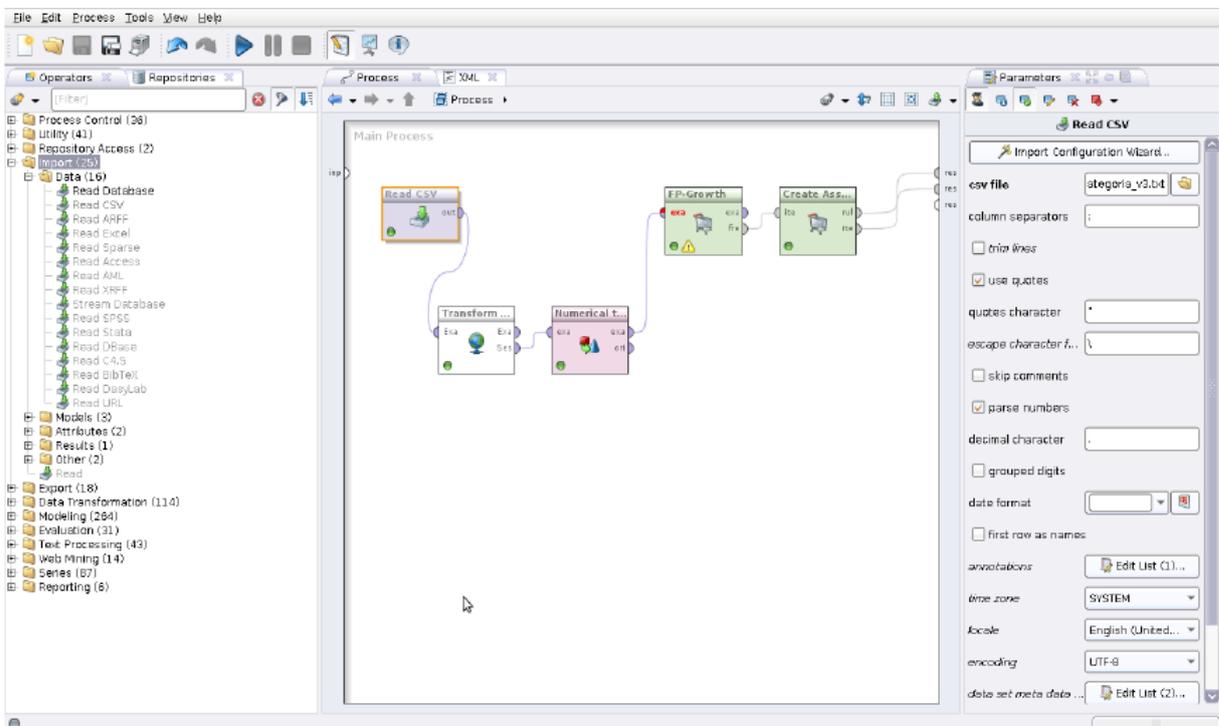


Figura 7.1 – Visão geral do Software RapidMiner
Fonte: Barth, 2006

As classes de operadores podem ser listadas como:

- **Controle de Processos:** Operadores como loops e condicionais que controlam o fluxo do processo;
- **Utilidade:** Operadores auxiliares que, junto com o operador “Subprocessos” para agrupamento de subprocessos, também contém macro operadores de criação de logs;
- **Acesso de Repositório:** Contém operadores para ler e escrever acessos ao repositório;
- **Importar:** Possui os operadores utilizados na leitura de dados e objetos vindos de formatos externos como arquivos, base de dados, dentre outros.
- **Exportar:** Contém os operadores utilizados na escrita de dados e objetos em formatos externos como arquivos e base de dados.
- **Transformação de Dados:** O maior e mais relevante grupo no qual estão todos os operadores para transformação de dados e meta-dados, pois em inúmeras situações são necessárias algumas operações para conversão de tipos, ordenação de valores, filtragem e limpeza dos dados antes da aplicação de algum algoritmo de aprendizagem.
- **Modelagem:** Contém os processos para realmente minerar dados, como métodos de classificação e regressão, clustering, pesagens, métodos para associação de regras, análises de correlação e similaridade e também operadores usados para aplicar os modelos gerados em conjunto de dados.
- **Avaliação:** Operadores que computam a qualidade de um modelo para novos dados, como validação cruzada e bootstrapping.

Ressalta-se que o RapidMiner contém mais de 500 operadores diferentes implicando em muitas vertentes das tarefas de análise de dados oferecidos, desde partição de dados até análises baseadas em mercados, para geração de atributos. Apresenta métodos de mineração de texto, mineração web e ainda análise e predição de séries de tempo (Bittencourt *et al.*, 2014)

7.3. METODOLOGIA

A metodologia proposta consiste em desenvolver uma ferramenta de auxílio na análise de dados de descargas parciais em hidrogeradores. Tal ferramenta consiste de um encadeamento de tarefas de mineração de dados, afim de fornecer padrões e classifica-los dentre os padrões definidos pela norma de maneira automática. Dessa forma, é possível ganhar agilidade no processo de identificação e análise dos problemas encontrados.

A Figura 7.2 apresenta um esquemático da metodologia proposta, na qual os dados das descargas são coletados pelo IMA-DP por meio dos mapas estatísticos. Em seguida, esses arquivos contendo os mapas estáticos são processados para que fiquem na forma de histogramas de amplitudes das descargas parciais (HDP), gerando assim uma base de dados (BDHDP). A partir de uma extensa base de dados, ou seja, um grande conjunto de informações das descargas nos geradores, utiliza-se a técnica K-means para identificar e agrupar os padrões, e assim cada amostra do BDHDP é rotulada como um dos padrões encontrados na clusterização (7 no total). A partir dos dados rotulados, uma DT é treinada a fim de classificar cada padrão, a partir de poucas variáveis, facilitando assim o trabalho do analista.

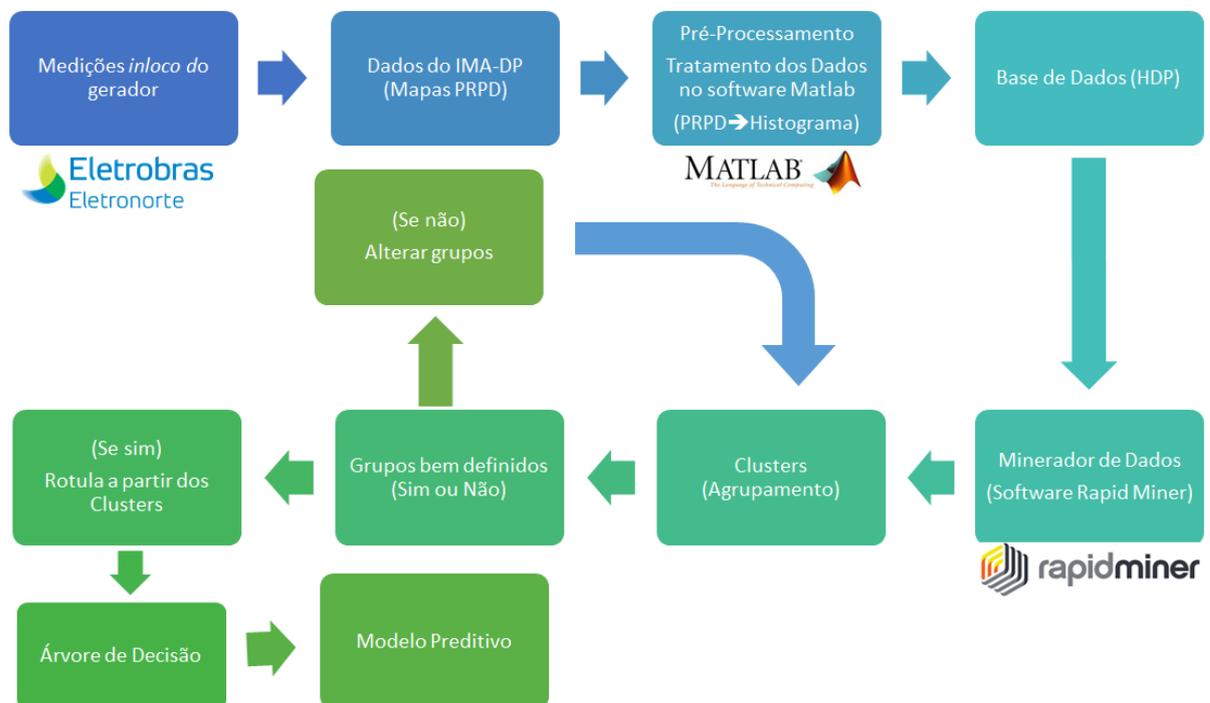


Figura 7.2 - Esquemático da Metodologia Proposta para Identificação de Descargas Parciais

O processo consistiu em etapas bem definidas, e que foram executados utilizando o software *RapidMiner*, os quais serão apresentados a seguir:

→ Etapa 01

Utilizou-se os dados brutos provenientes das medições *in loco* do gerador realizadas através do IMA-DP Intensivo e IMA-DP Autônomo. Estes fornecem informações dos mapas PRPDs de descargas parciais e apresentam informações de magnitude, fase e frequência em número de pulsos das DPs, sendo estes selecionados antes do início do pré-processamento.

→ Etapa 02

Realizou-se um pré-processamento dos dados convertendo os mapas de PRPD em histogramas de amplitude. Esta escolha foi feita devido à complexidade dos mapas PRPDs, pois os dados tem formatos distintos das matrizes para cada medição, além de serem bem maiores para o processamento. Fazendo esta transformação a leitura passa a ser mais simples e ágil contendo as mesmas informações.

Esta leitura e transformação foi realizada através de uma ferramenta desenvolvida em software *MATLAB*, a qual teve seus princípios baseados na referência (Silva, 2015).

Primeiramente utilizou-se os arquivos brutos com extensão *.dp* e é possível ler números como os mostrados: 256 256 4025 0 197 1 9 191

O programa no *MATLAB* criado por (Silva, 2015) visualiza os arquivo com extensão *.tsv* (*tab separated values*, valores separados por “tab”) como uma matriz coluna, este programa possibilita reproduzir mapas estatísticos 2D e histogramas de amplitude. Os três primeiros valores do arquivo servem como cabeçalho e não trazem informações importantes. Os valores seguintes que foram gerados para um ensaio único no IMA-DP são separados dentro de uma matriz de m linhas por 3 colunas. Cada linha existe para cada ponto da grade de 65.536 pontos discretos que tiver registrado alguma atividade de descarga parcial, este remete a uma matriz quadrada 256x256. Dentre as colunas, a primeira coluna é a pico de um pulso de tensão, a segunda é a fase, e a terceira é o taxa de repetição para aquele ponto no ciclo.

O histograma de amplitude para ser visualizado é necessário criar loops que separem a amplitude de todos os pontos dentro da medição em um número de janelas pré-determinadas em relação ao maior valor registrado. Por exemplo, se o número de janelas fosse determinado para 10 e se o maior valor registrado numa medição fosse 1000 mV, haveriam 10 janelas de amplitude com 100 mV de tamanho variando entre 0-100 mV até 900-1000 mV. Os pontos registrados dentro de cada intervalo (janela) de amplitude serão somados e assim poder-se-á plotar o histograma de amplitude. Na Figura 7.3 há três janelas de valores para descargas positivas e três janelas para descargas negativas (Janelas de DP: $0 < |DP| \leq 1$ mV, $|DP| \leq 2$ mV, $|DP| \leq 3$ mV).

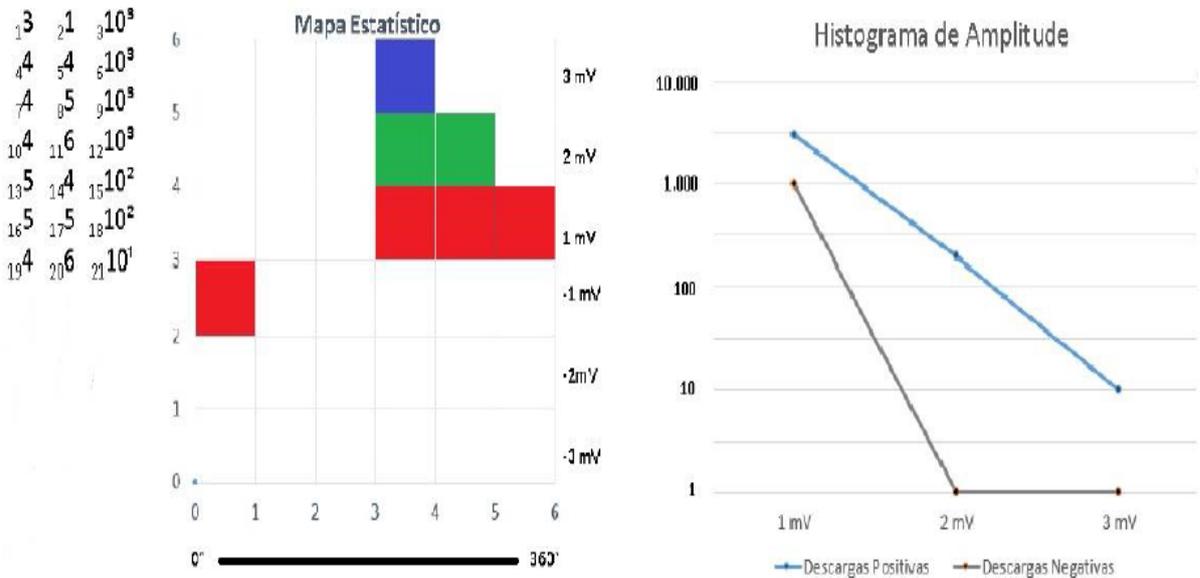


Figura 7.3 – A partir da matriz nx3 gera-se também o histograma de amplitude
 Fonte: Silva, 2015, pg. 94

O histograma de amplitude é semi-logarítmico. No eixo vertical tem-se o logaritmo na base 10 da quantidade de pulsos de uma janela e no eixo horizontal o valor final de cada janela. Os histogramas produzidos são semelhantes ao apresentado na Figura 7.4, no qual o eixo x representa a amplitude e o eixo y representa a frequência de pulsos das descargas parciais.

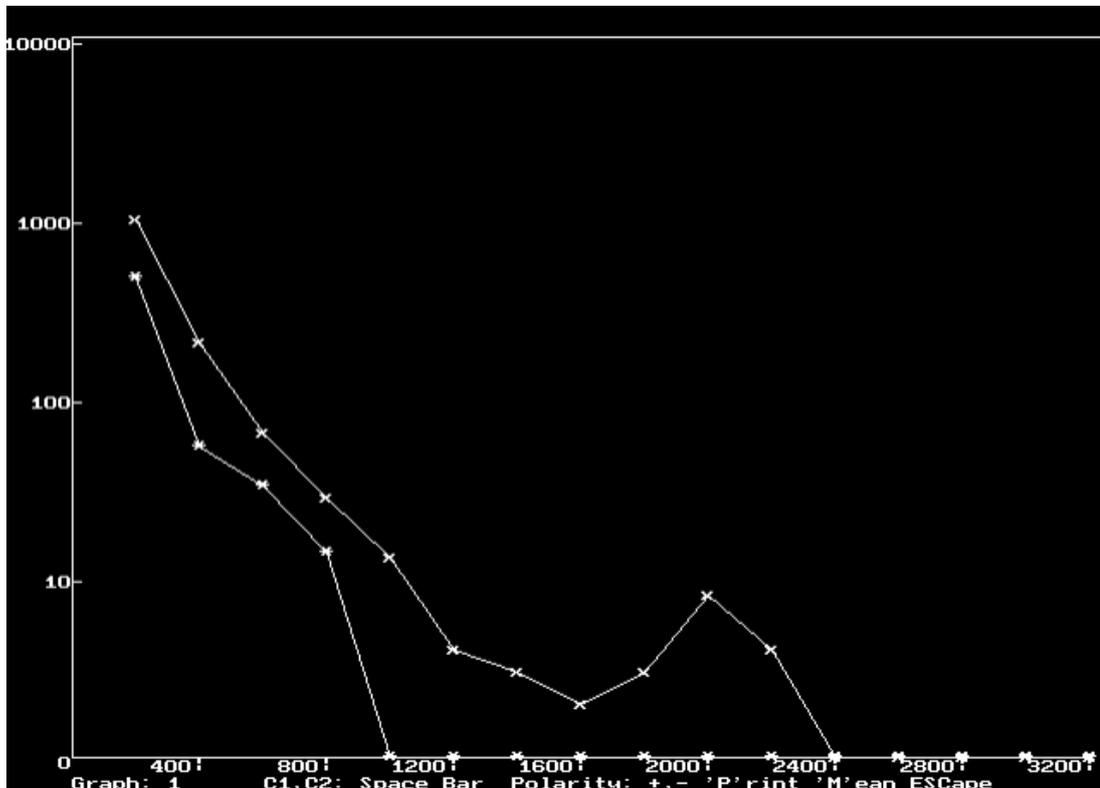


Figura 7.4 – Histograma de Amplitude

→ Etapa 03

Com esta leitura e transformação de dados para uma versão mais simplificada e leve, há uma organização de todas as informações em um arquivo .txt. Isto ocorre transformando as figuras, com extensão .fig criadas, computando as informações nelas contidas e registrando-as em um vetor, em seguida ocorre a geração de uma base sólida de dados, no qual estes dados estão em um mesmo formato e prontos para serem minerados, faz-se a alimentação do processo com este arquivo base.

→ Etapa 04

Nesta etapa de mineração de dados escolheu-se a técnica de clusterização k-means para realizar o procedimento. Como já se tinha feito uma pré-análise dos tipos de descargas parciais que seriam encontradas nos dados do banco de dados estabeleceu-se um número de sete clusters como o ideal para solucionar o problema. O restante do algoritmo então é semelhante ao apresentado no tópico 6.2.3.2 do capítulo anterior. A partir do momento que o sistema não apresenta mais mudanças, ou seja, não há mais alterações no grupo por algum objeto, então se estabelece padrões.

→ Etapa 05

A partir do momento que os clusters são formados averigua-se se os grupos estão bem definidos, se sim rotula-se cada um deles, se não se realiza o processo novamente de iteração até obter grupos satisfatórios.

→ Etapa 06

Com os clusters bem definidos inicia-se a etapa de classificação que será por meio da árvore de decisão e o algoritmo de indução utilizado foi o tipo CART, esta escolha foi embasada pela habilidade da técnica de gerar uma árvore de dimensão reduzida, mas que apresenta elevado desempenho e capacidade de generalização. Para realizar esse procedimento, a estratégia utilizada é a *top-down* e esta é feita automaticamente no software *RapidMiner*. Baseia-se em um arquivo de treinamento com dados previamente rotulados e constrói uma árvore de decisão, particionando em duas ligações cada nó, função de apenas um atributo, e separando os registros de cada partição. O resultado obtido do CART é a geração de uma árvore de decisão binária univariada, de grande simplicidade e legibilidade, que pode ser percorrida da raiz até as folhas através de testes do tipo “sim/não”, e pode-se verificar a classe e a taxa de erro de cada folha.

→ Etapa 07

Por fim com a árvore de decisão pronta pode-se então estabelecer um modelo preditivo e então conseguir fazer a classificação do tipo de DPs automaticamente.

7.3. RESULTADOS

Utilizando-se o software *Rapid Miner* aplicou-se a metodologia descrita no item anterior e exemplificada através da Figura 7.2. O processo realizado no *RapidMiner* apresenta-se na Figura 7.5 em que as etapas se dividem através de blocos:

- *Read CVS* : É o bloco onde há a inserção do banco de dados criado, no caso foi inserido o arquivo com extensão *.txt*;
- *Clustering*: Neste bloco é realizado o processo de clusterização utilizando o método k-means, ou seja, ocorre o agrupamento dos dados semelhantes em cada grupo específico, nesta etapa define-se o atributo que será utilizado, número de grupos que se deseja obter e o número de interações que serão realizadas para uma melhor resposta do sistema.
- *Apply Model*: O operador aplica o modelo aprendido ou utilizado em um dos exemplos e assim pode-se criar modelos de predição, nesta etapa é utilizado os clusters obtidos na etapa anterior e cria-se uma árvore de decisão, ou seja, é a etapa na qual aplica-se a base de teste no modelo.
- *Set Role*: Utiliza-se para alterar a função de um ou mais atributos, é a etapa de organizar os grupos, ou seja, é a etapa de rotular os clusters obtidos, coloca-se o cluster como atributo e label na base de dados.
- *Validation*: Este operador realiza a *cross-validation*, que fornece uma estimativa do desempenho e precisão com que o modelo irá realizar as decisões na prática.

Foram inseridos 2435 dados de medições os quais representavam informações dos 8 acopladores da fase A de um hidrogerador da Casa de Força 1 da UHE de Tucuruí, destacando-se que o método pode ser replicado as demais fases. Evidencia-se que houve esta escolha pelo fato que as medições na fase A deste gerador apresentavam quase todos os padrões de descargas parciais explicitados pela norma, no entanto não houve o padrão de delaminação, pois não é uma característica normalmente presenciada nas máquinas da Usina Hidrelétrica de Tucuruí apresentar este padrão. Os tipos mais frequentes são corona, descargas na ranhura e descargas internas.

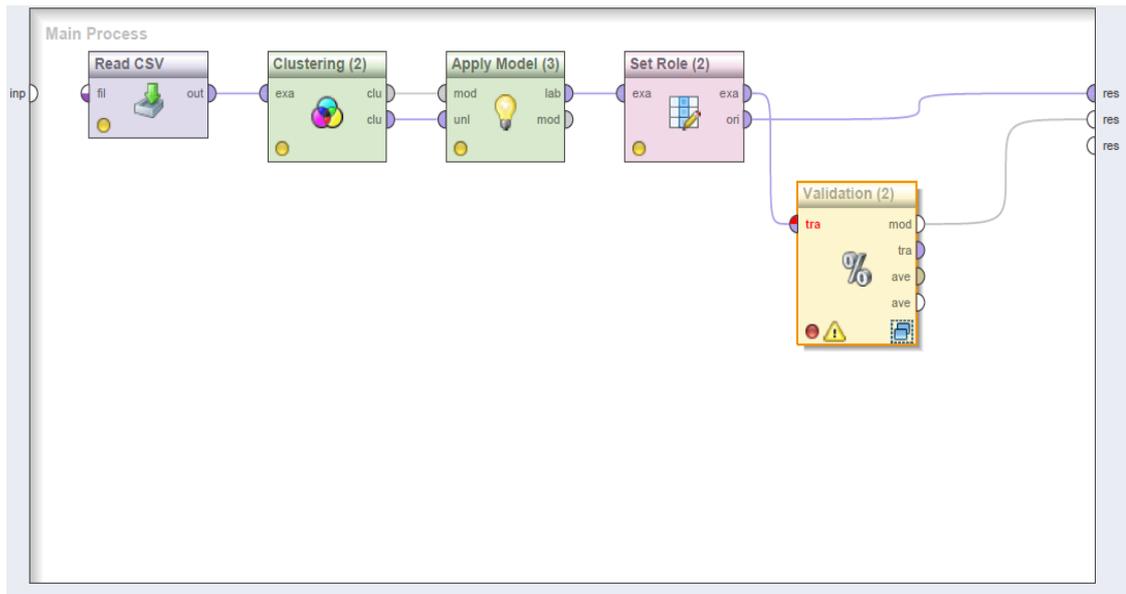


Figura 7.5 – Processo de Mineração e Validação no *RapidMiner*

Através do Sistema do IMA-DP Intensivo, cujo software está instalado em um PXI, este consiste em uma plataforma baseada em PC para sistemas de medição e automação, que capta os sinais provenientes dos acopladores, e estes sinais de DPs são traduzidos em mapas estatísticos que apresentam a magnitude por fase. O funcionamento e fotos do equipamento foram apresentadas no capítulo 05.

Em seguida esses dados são processados de mapas estatísticos para histogramas de amplitude em base logarítmica para a classificação dos padrões, estabelecidos pela norma IEEE 1434. Deste modo constitui-se uma base de dados consistente e ampla. Através desta gama de dados começa-se o processo de mineração de dados que consiste em averiguar os padrões e separá-los em clusters (grupos), que neste caso foram escolhidos 7 grupos, que representam 6 padrões definidos por norma e 1 padrão que encaixaria casos que possuem que não apresentam um padrão bem definido devido à baixa magnitude e frequência das descargas parciais.

Ressalta-se que o embasamento e treinamento da ferramenta foi fundamentada em dados reais, ou seja, quando se determinou o número de casos já era esperado que um dos padrões não aparecesse, no caso o padrão de delaminação, como já comentado, porém ao se replicar a técnica para as demais fases do gerador e por conseguinte para as demais máquinas este padrão tenderá a aparecer com a inserção de novos dados ao sistema.

Tendo os clusters definidos chegou-se a casos de padrões de descargas parciais, apresentados na Figura 7.6. Nota-se que os centroides (cada centroeide representa um grupo) encontrados pelo algoritmo K-means, representam de forma satisfatória cada um dos padrões de DPs que ocorreram na fase “A” do hidrogerador estudado.

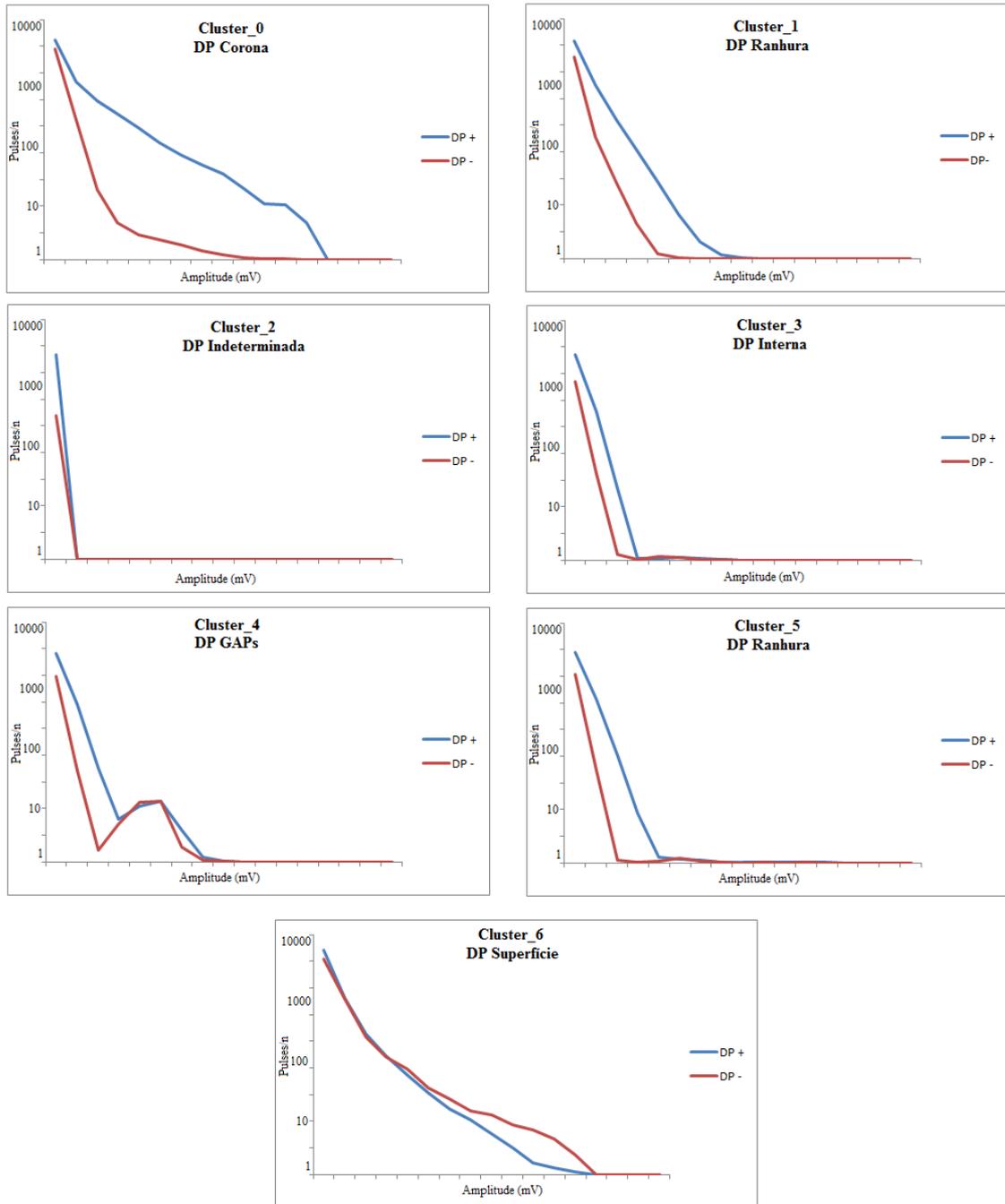


Figura 7.6 – Clusters e Correspondência com Padrões na Norma

A partir da definição dos clusters, pode-se utilizar cada um deles como rótulo para o treinamento de uma máquina de aprendizado supervisionada, tornando-se possível o treino de uma árvore de decisão, que após treinada venha auxiliar a identificação de novas medições em cada padrão determinado, trabalhando com um número menor de variáveis, resultando em uma leitura mais rápida e eficaz. Esses aspectos podem contribuir para melhorar a certeza nos diagnósticos que serão realizados e por conseguinte tem-se um modelo preditivo do sistema, baseado em um conjunto de regras do tipo “se-então”.

A Figura 7.7 apresenta a árvore de decisão obtida e na Figura 7.8 apresenta-se um ramo da DT, para melhor visualização, criada para a classificação das DPs, contendo as

regras que são seguidas para a classificar os padrões de DPs, isto é, quais os valores no histograma de amplitudes correspondem aos padrões a serem averiguados em cada caso.

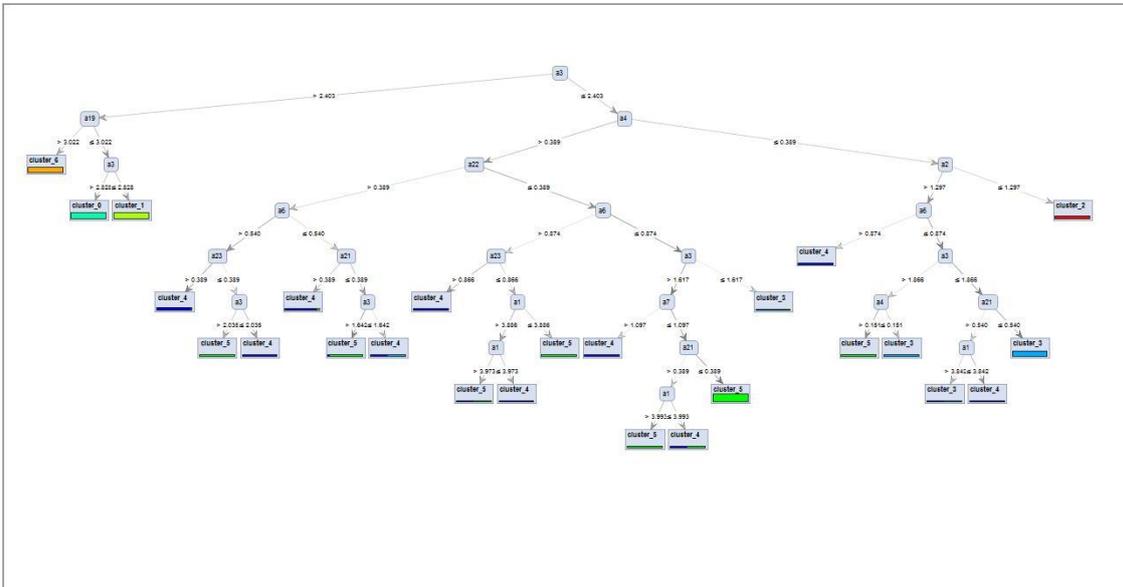


Figura 7.7 – Árvore de Decisão para Identificação de Padrões de Descargas Parciais

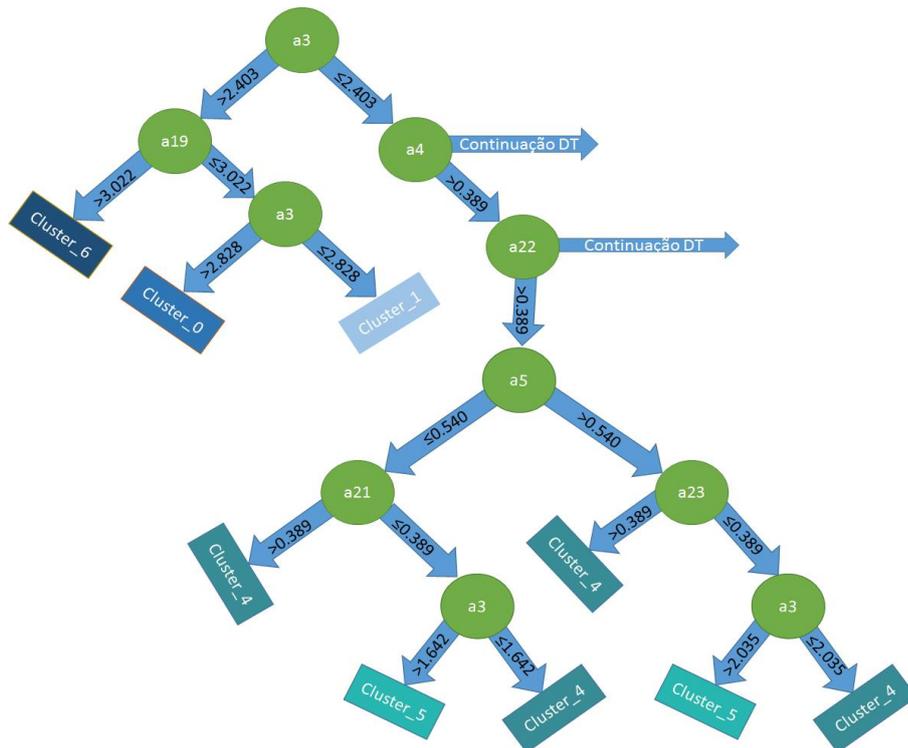


Figura 7.8 – Trecho da Árvore de Decisão

Para o treino, teste e validação da DT, foi utilizada a técnica *K-fold crossvalidation*, onde comprovou-se que o modelo criado pela DT, representa de forma bastante adequada a classificação das DPs. É possível comprovar isto pela matriz de confusão, apresentada na tabela 7.1, a qual mostra a alta taxa de acerto obtida para todos os padrões classificados. A menor taxa de acerto ocorreu para o padrão referente ao cluster 4 que representa

descargas do tipo GAPS, sendo esta de 92,42%, tendo-se obtido valores de 100% para a maioria dos padrões analisados, resultando uma taxa de acerto global (accuracy) superior a 98%.

Tabela 7.1 – Matriz de Confusão Caso-Real

Accuracy: 98,54% +/- 0.75% (mikro:98,54%)								
	True cluster_4	True cluster_3	True cluster_0	True cluster_5	True cluster_1	True cluster_6	True cluster_2	Class Precision
Pred. Cluster_4	183	5	0	9	1	0	0	92,42%
Pred. Cluster_3	5	364	0	4	0	0	0	97,59
Pred. Cluster_0	0	0	379	0	0	0	0	100%
Pred. Cluster_5	10	2	0	607	0	0	0	98,06%
Pred. Cluster_1	0	0	0	0	382	0	0	100,00%
Pred. Cluster_6	0	0	0	0	0	385	0	100,00%
Pred. Cluster_2	0	0	0	0	0	0	135	100,00%
Class Recall	92,42%	98,11%	100,00%	97,90%	99,74%	100%	100,00%	

O algoritmo proposto classifica corretamente os grupos apresentando baixos valores de erros para falsos positivos apesar da base de dados ter classes desbalanceadas, ou seja, número de casos para cada classe não são iguais.

Em situações desta natureza é comum as taxas de acerto serem maiores para as classes majoritárias em detrimento das minoritárias, o que explica o porquê do cluster 4 ter apresentado a menor taxa de precisão.

Observa-se que os clusters 1 e 5 apresentam o mesmo padrão de descarga parcial que seria o de ranhura, esta escolha de sete clusters, como mencionado previamente, teve-se o intuito de agrupar todos os padrões normatizados e um cluster para conter casos indefinidos, no entanto o padrão de DP de delaminação não existia no banco de dados utilizados e como a imagem gerada do padrão de ranhura pode ter leves oscilações na formação das suas curvas decidiu-se manter o número de sete clusters para avaliação.

Esses dois clusters juntos totalizam 1001 casos, ou seja, mais de 40% dos dados utilizados para análise apresentavam este padrão. Apesar de os dados serem de apenas uma das máquinas da UHE de Tucuruí pode-se afirmar que este padrão de descarga parcial é o mais obtido nos demais geradores, o que é preocupante devido à alta gravidade deste tipo de DP.

As descargas de ranhura em hidrogeradores acontecem quando o revestimento da parte condutiva na ranhura se danifica devido ao movimento da barra ou bobina na ranhura, a magnitude tende a se elevar cada vez mais devido ao nível de deterioração em decorrência destes danos mecânicos o que pode acarretar em danos à isolação principal e conforme vai se agravando pode gerar uma falha.

O tempo entre a detecção do problema por meio das medições e a falha ocorrer pode ser relativamente curto se for constatado a presença de vibração das barras ou bobinas, portanto intervenções no enrolamento devem ser feitas o mais breve possível.

A averiguação deste tipo de incidente costuma ser visual ao entrar no gerador, no entanto essa detecção não é simples devido ao difícil acesso e por se tratar de um espaço confiando acarreta riscos ao técnico, mas se constatado o problema recomenda-se refazer a isolação nas barras ou bobinas defeituosas.

7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à necessidade de se aprimorar os diagnósticos do enrolamento estatórico embasados nas medições de descargas parciais desenvolveu-se uma ferramenta inteligente que possibilitará a identificação de tipos de descargas parciais como apresentados nas normas. Isto facilita um diagnóstico, pois além de averiguar a gravidade de DP alicerçada na sua magnitude pode-se então saber a localização desta na barra e/ou bobina.

A princípio escolheu-se apenas fazer a identificação automática dos padrões, isto porque esta etapa era uma das mais demoradas para realizar os diagnósticos e conseqüentemente demandava um tempo maior para emissão de relatórios do estado do enrolamento da máquina.

A opção de se trabalhar com dados no formato de histogramas de amplitude e de apenas utilizar informações da fase A da máquina foi devido ao volume de dados utilizados, mas o que não impediu de criar padrões de identificação aceitáveis e condizentes com a norma IEEE 1434 e como se observou obteve-se uma taxa de acerto global superior a 98%, o que validaria o método.

Posteriormente irá se replicar este processo de diagnóstico para as demais fases e outras unidades hidrogeradoras da UHE de Tucuruí.

CAPÍTULO 08 – CONCLUSÕES

8.1. CONSIDERAÇÕES

Devido ao investimento em sistemas de monitoramento e necessidade de proporcionar disponibilidade constante dos equipamentos elétricos naturalmente houve aprimoramento nas técnicas aplicáveis para realizar as medições, em especial das descargas parciais para avaliação das condições do isolamento estatórico do gerador e tentar evitar possíveis falhas. Com estes avanços conseqüentemente teve-se uma periodicidade maior para realização de testes e por conseguinte houve um aumento no volume de dados de descargas parciais.

Tornou-se inviável a análise manual destes resultados, muitas informações importantes acabavam não sendo computadas, então extrair o máximo de informação útil e emitir diagnósticos mais precisos foram grande motivação para este trabalho.

Para se atingir objetivos propostos foi crucial aprofundar conhecimentos a respeito das técnicas e métodos de detecção de descargas parciais, além de entender as particularidades deste fenômeno aplicáveis a hidrogeradores, aliar todo esse conhecimento ao processo de mineração de dados, parte do processo de KDD, foi primordial para extração do máximo de informação favorável ao propósito estabelecido.

Aprimorar o modo que era realizado os diagnósticos do enrolamento estatórico embasados nas medições de descargas parciais tornou-se um desafio e para contornar este problema desenvolveu-se uma ferramenta inteligente que possibilitará a identificação de tipos de descargas parciais como apresentados nas normas. Isto facilita um diagnóstico, pois além de averiguar a gravidade de DP alicerçada na sua magnitude pode-se então saber a localização desta na barra e/ou bobina e posteriormente o trecho de maior probabilidade de ocorrência ao longo do estator.

Utilizando-se dos dados fornecidos através do Sistema do IMA-DP e fazendo os devidos tratamentos nestes utilizando técnicas de mineração de dados foi possível transformar os mapas estatísticos em histogramas de amplitude, os quais são mais simples e facilitam o reconhecimento dos padrões pelo programa criado, obviamente houve uma etapa maior para tratar os dados antes da mineração com esta transformação, mas o tempo de resposta após todo o processo diminuiu bastante, pois as informações no histograma de amplitude ficam mais condensadas que no mapa PRPD.

A escolha de representar em histogramas também foi feita pelo fato da grande quantidade de dados que seriam originalmente utilizados no treinamento do sistema e o volume de dados também foi um dos motivos de se trabalhar apenas com a fase A nesta fase do trabalho, o que já conta com 2435 medições inseridas, a qual é composta da análise de 8 acopladores, mas ressalta-se que futuramente irá se replicar os estudos para as

demais fases da máquina em questão, e posteriormente para as demais máquinas da UHE de Tucuruí.

A utilização de dados reais foi crucial para garantir a validação do método, pois nas análises realizadas quase todos padrões estabelecidos por norma estavam presentes, com exceção da delaminação, e o sistema de classificação aqui proposto os reconheceu e apresentou através dos Clusters todas estas categorias de forma bem definida e como demonstrado atingiu uma taxa de acerto global de 98%, o menor nível de acerto apresentou 92,42% e vários outros clusters proporcionaram 100% de exatidão.

Diante destes resultados animadores obteve-se uma árvore de decisão bem treinada possibilitando reconhecer padrões de descargas parciais ao se inserir novos dados ao sistema, tornando assim o trabalho para o analista menos oneroso e mais ágil.

8.2. TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros ampliar-se-á as análises não apenas embasados nos histogramas, mas também nos mapas estatísticos, e espera-se replicar a ferramenta para as demais máquinas da UHE de Tucuruí, bem como inserir na linha de análise, padrões para determinar a gravidade da descarga parcial embasada na magnitude atrelada ao reconhecimento de padrões, pois cada padrão tem um nível de gravidade diferente do outro devido a sua localização no enrolamento, e assim deste modo emitir um diagnóstico mais completo e real da situação do isolamento elétrico do gerador.

Posteriormente almeja-se padronizar as linhas de análise para cada tipo de máquina presente na Usina Hidrelétrica de Tucuruí, ou seja, estabelecer padrões para cada gerador de fabricantes diferentes, pois cada um apresenta suas devidas distinções do enrolamento e deste modo mostrar os níveis reais de suportabilidade dielétrica do estator de cada equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDRIANS, P. & ZANTINGE, D. “Data Mining”. Inglaterra: Addison-Wesley, 1996

ALVARESTECH. Disponível em: <<http://alvarestech.com/temp/eletronorte2011-Araujo/AneelHistoricoELN/58912/REL%20FINAL/Relat%F3rios%20mensais/Relat%F3rioM%EA12/Fen%F4meno%20das%20descargas%20parciais%20causado%20por%20efeito%20da%20temper.pdf>>. Acesso em: 16 de agosto de 2013.

AMORIM, T., “Conceitos, Técnicas, Ferramentas e Aplicações De Mineração De Dados Para Gerar Conhecimento A Partir De Base De Dados”. Monografia de Graduação em Ciência da Computação, Centro de Informática Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2006

AMORIM, H.P., LEVY, A.F.S., CARVALHO, A.T., SANZ, J., NASCIMENTO, W.G., REBELO, J., PORTELA, M., “Instrumentação para Monitoramento e Análise de Descargas Parciais (IMA-DP): Experiência na Usina de Tucuruí - Eletronorte - Máquinas 1 e 2”, Tucuruí, Brasil, 2007

AMORIM, H.P., LEVY, A.F.S., CARVALHO, A.T., “Estudo Sobre a Influência dos Acopladores Capacitivos na Sensibilidade da Medição de Descargas Parciais em Máquinas Elétricas Rotativas”. In: XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica – GGH, Recife, Brasil, 2009.

AMORIM, H.P., LEVY, A.F.S., CARVALHO, A.T., “Medições de Descargas Parciais no Campo – Aspectos Práticos em Geradores e Motores”. In: XIII ERIAC Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, Comité de Estudos A1 – Máquinas Elétricas Rotativas, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.

AMORIM, H.; TOMAZ, A.; BAPTISTA, T.; PARDAUIL, A.C.; SOUZA, D.; BRASIL, F.; SANTOS, J., “ Avaliação de Sete Unidades Geradoras em Operação da UHE Tucuruí Através das Descargas Parciais com o IMA-DP”. In: VI ENAM-Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, Taubaté, Brasil, 2014

BABNIK, T.; AGGARWAL, R.; MOORE, P., “Data Mining on a Transformer Partial Discharge Data Using the Self-organizing Map”. In: Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (Volume:14 , Issue: 2), 2007

BARANAUSKAS, J.A., “Indução de Árvores de Decisão”. Apresentação Departamento de Física e Matemática, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2011

BARTH, F.J., “Mineração de Regras de Associação em Servidores Web com RapidMiner”. Disponível no site <<http://fbarth.net.br/materiais/webMining/>>. Brasil, 2006.

BARBOSA, J.M.; CARNEIRO, T.G.S.; TAVARES, A.I., “Métodos de Classificação por Árvores de Decisão”. Artigo da Disciplina de Projeto e Análise de Algoritmos, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2012

BERRY, M.J.A, LINOFF, G., “Data Mining Techniques for Marketing, Sales and Customer Support”. John Wiley & Sons, Inc., 1997.

BITTENCOURT, R.; SALLÉ, J.; JALLOULE, J.; “RapidMiner Aprenda a Usar”. Disponível em: <<https://prezi.com/-yo8qjamdbbq/rapidminer-aprenda-a-usar/>>. Brasil, 2014

BOCK, H.H., “Origins and extensions of the k-means algorithm in cluster analysis”. Journ@l Electronique d’Histoire des Probabilités et de la Statistique, Vol 4, n°2, Paris, França, 2008

BRASIL, F.S., “Estudo Experimental De Técnicas De Medição De Descargas Parciais Nos Enrolamentos Estatóricos De Hidrogeradores”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2013

BRASIL, F.S., SILVA, J.S., VILHENA, P.R.M., “Descargas Parciais em Hidrogeradores”. Treinamento Interno de Descargas Parciais em Máquinas Rotativas da Eletrobras Eletronorte, Tucuruí, Brasil, 2015.

BUENO, M.F., Viana, M.R., “Mineração de Dados: Aplicações, Eficiência e Usabilidade”. IN: INCITEL – Anais do Congresso de Iniciação Científica do INATEL, Santa Rita do Sapucaí, Brasil, 2012.

CAMILO, C.O., Silva, J.C., “Mineração de Dados: Conceitos, Tarefas, Métodos e Ferramentas”. Relatório Técnico, Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, Brasil, 2009.

CAMPOS, N.P., “Análise de Circuitos de Descargas Parciais”. No 1º Encontro Nacional sobre Descargas Parciais, São Paulo, Brasil, 1983.

CARVALHO, A. T., “Seleção de Bases Wavelet para Redução do Ruído de Banda Larga em Medições de Descargas Parciais em Máquinas Síncronas”. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

CARVALHO, A. T.; AMORIM, H. P.; PARDAUIL, A.C.N.; CARVALHO, D.S.; BRASIL, F. S.; VILHENA, P. R. M., “Sistema de Monitoramento Intensivo de Descargas Parciais em Hidrogeradores”. In: XVI ERIAC- Decimosexto Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, Comité de Estudio A1 – Máquinas Eléctricas Rotativas, Puerto Iguazú, Argentina, 2015.

CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, “CIGRÉ 392 Survey of Hydrogenerator Failures”, Working Group A1.10, 2009.

CÔRTEZ, S.C.; PORCARO, R.M.; LIFSCHITZ, S.; “Mineração de Dados – Funcionalidades, Técnicas e Abordagens”. PUC-RIO INF. MCC10/02, Rio de Janeiro, Brasil, 2002

CUENCA, W.M.H., “Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais”. Tese de Doutorado, Programa Pós-Graduação de Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

CSANYI, E., “Ionization (Corona Discharge) Tests”. ELECTRICAL ENGINEERING PORTAL, 2011.

DARABAD, V.P.; VAKILIAN, M., “Data Mining on Partial Discharge Signals of Power Transformer’s Defect Models”. In: 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cardiff, País de Gales, 2010.

DILLY, R. “Data Mining: an introduction.” Belfast: Parallel Computer Centre, Queens University, 1999

ELETRONORTE, “Programa De Formação E Aperfeiçoamento De Equipes Sistêmicas Da Geração Interligada: Geradores Elétricos UHE Tucuruí”. Apresentação Em Treinamento Interno da Eletrobras Eletronorte, Brasil, 2013

ELETRÔNICA DIDÁTICA. Capacitor. Disponível em: <<http://www.eletronicadidatica.com.br/componentes/capacitor/capacitor.htm>>. Acesso em: 12 de agosto de 2013.

FAIER, J.M., “Curvas Principais Aplicadas na Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos de Potência”. Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação de Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

FONSECA, J.M.M.R., “Indução de árvores de decisão: HistClass – Proposta de um Algoritmo Não Paramétrico.” Dissertação de Mestrado em Engenharia Informática, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 1994

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, “IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery”, USA, 2014.

INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60270 High Voltage Test Techniques – Partial Discharges Measurements”. Suíça, 2000.

INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60034-27-2 Rotating Electrical Machines – Part 27-2: On-line Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines”. Suíça, 2012.

HALMENSCHLAGER, C., “Um Algoritmo para Indução de Árvores e Regras de Decisão”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HUDON, C., BÉLEC, M., “Partial Discharges Signal Interpretation for Generator Diagnostics”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, No. 2, 2005, pp. 297-319.

JOSHI, A. R., “On-line Measurement of Partial Discharges in High Voltage Rotating Machines”. Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Philosophy, The Robert Gordon University, Aberdeen, Reino Unido, 2011.

KREUGER, F. H. Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment. 1.ed. London: Butterworths, 1989

LAI, K.X.; PHUNG, B.T.; BLACKBURN, T.R., “Descriptive data mining of partial discharge using decision tree with genetic algorithm”. In: AUPEC Australasian Universities Power Engineering Conference, Sidney, Austrália, 2008.

LAI, K.X.; PHUNG, B.T.; BLACKBURN, T.R., “Investigation Of Partial Discharge In Single Void And Multi-Voids Using Data Mining Technique”. In: AUPEC Australasian Universities Power Engineering Conference, Adelaide, Austrália, 2009

LAI, K.X.; PHUNG, B.T.; BLACKBURN, T.R.,” Application of Data Mining on Partial Discharge. Part I: Predictive Modelling Classification”. In: Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (Volume:17 , Issue: 3), 2010

LEAL, L.B., “Descargas Parciais Em Barras/Bobinas Do Circuito Do Estator De Máquinas Síncronas”, Dissertação de Graduação, Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2009

LEMKE, E. WG D1.33 Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270. Relatório técnico, Cigre, 2008.

LIAO, R.; FERNANDESS, Y.; TAVERNIER, K.; TAYLOR, G.A.; IRVING, M.R., “Recognition of Partial Discharge Patterns”. In: Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2012

MANNILA, H. “Data mining: machine learning, statistics and databases.” International Conference on Statistics and Scientific Database Management., 1996

MAXWELL. Clusterização. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/24787/24787_5.PDF>. Acesso em: 04 de janeiro de 2016.

MIKAMI, R.; SANTOS, L.D.M.; VENDRAMIN, A.C.B.K.; KAESTNER, C.A.A., “Procedimentos de Validação Cruzada em Mineração de Dados para ambiente de Computação Paralela”. Artigo do Departamento Acadêmico de Informática Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2009.

MODERNA PLUS. Equação de Arrhenius. Disponível em: <<http://pnld.moderna.com.br/wp-content/uploads/2011/06/Arrhenius.pdf>>. Acesso em: 22 de novembro de 2013.

NASCIMENTO, L.F.A, LEITE, R.N.G, “Sistema de Medição de Descargas Parciais em Hidrogeradores”. No I SIMOP – I Seminário Integrado de Operação e Manutenção, Gerenciamento de Manutenção – Manutenção Preditiva, Belém, Brasil, 1990

NATIONAL INSTRUMENTS . Disponível em: <http://www.ni.com/modularinstruments/pt>. Acesso em 04/01/2016.

NATIONAL INSTRUMENTS . Disponível em: <http://www.ni.com/pxi/whatis/pt/>. Acesso em 04/01/2016.

NATTRASS, D.A., “Partial Discharge XVII: The Early History of Partial Discharge Research”. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1993, Volume:9, Número:4, pp. 27-41

NISHI. Disponível em: <http://www.nishi.com.br/portugues/link_not_nishisan.php?id=14>. Acesso em: 20 de agosto de 2013.

OLIVEIRA, W.D., “Comparação dos Algoritmos C4.5 e MLP Usados na Avaliação da Segurança Dinâmica e no Auxílio ao Controle Preventivo no Contexto da Estabilidade Transitória de Sistemas de Potência”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2013

PARDAUIL, A.C.N.; BEZERRA U.H.; OLIVEIRA, W.D.; AMORIM, H.P.; CARVALHO, A.T., “Uso de Técnicas de Mineração de Dados para Extração de Indicações de falha na Operação de Hidrogeradores a partir de Medidas de Descargas Parciais”. In: XXIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica, Foz do Iguaçu, Brasil, 2015.

PENG, X.; ZHOU, C.; HEPBURN, D.M., “Automatic Partial Discharge Pattern Recognition for Use in On-line Cable Condition Monitoring Systems”. In: CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Alemanha, 2011.

POULTON, G.; SMITH, C.; HO, W.S.; “Data Mining Methods to Predict Failure Due to Partial Discharge”. In: CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Alemanha, 2011.

POZZER, C.T., “Aprendizado por Árvores de Decisão”. Apostila da Disciplina de Programação de Jogos 3D, Departamento de Eletrônica e Computação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2006

PRAMPERO, P.S.; BOCCATO, L.; ATTUX, R., “Otimização Multimodal Baseada em Clusterização”. Artigo Faculdade Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campinas, Campinas, Brasil, 2012

PRASS, F. “Algoritmo de K-Means”. Blog Sopa de Letrinhas, Brasil, 2013. Disponível em: <http://fp2.com.br/blog/index.php/2013/algoritmo-de-k-means/>. Acesso em: 02/01/2016

RODRIGUES, B.G.D., “ Uso de Árvore de Decisão para Avaliação da Segurança Estática em tempo real de Sistemas Elétricos de Potência”. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2014

SABAT, A., “ Simulation of Partial Discharge in High Voltage Power Equipment”. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of Master of Technology in Power Control and Drives, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, India, 2011

SADIKU, M. N.O., “Elementos de Eletromagnetismo”. Porto Alegre: Bookman, 3a Edição, 2004

SANTOS, M.P.S., “Mineração de Dados - Conceitos, Aplicações e Experimentos com Weka”. Brasil, 2004. Disponível em: <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/erirjes/2004/004.pdf>

SANTOS, R.L.S., “Estudo da Influência do Ciclo de Partidas e Paradas no Estator de Geradores Síncronos”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2011

SILVA, G.C., “Descargas Parciais Estimuladas Por Raios-X Contínuo E Pulsado Em Materiais Dielétricos: Similaridades E Diferenças”. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005

SILVA, P.B.N., “Monitoramento e Análise de Descargas Parciais na Isolação de Enrolamentos Estóricos da UHE-Tucuruí”. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, Brasil, 2015.

STONE, G.C., “Theory of The Partial Discharge Analyzer Test”, Presented to EPRI/CEA Workshop on the PDA and RF Monitoring, Toronto, Canada, 1986

TAN, P.N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V.; “Introdução ao Data Mining - Mineração de Dados”. Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, Brasil, 2009

TAYLOR, N., “Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on StatorInsulation at Varied Low Frequency”. Tese de Doutorado, School of Electrical Engineering, Suécia, 2010.

TEIXEIRA JR, J., “Medição de Descargas Parciais”. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2015.

TEKNOMO, K., “ Numerical Example of K-Means Clustering”. Disponível em: <<http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/kMean/NumericalExample.htm>>. Acesso em 03/01/2016

TORQUATO, M.; Oliveira, D., “Técnicas de Clustering: Algoritmos K-Means e Aglomerative”, Apresentação Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2012

UEMORI, M., ROCHA, J., “Fundamentos de Projetos e Reabilitação de Geradores para Centrais Hidrelétricas”, Princípios de Manutenção e Reabilitação de Geradores Síncronos, Brasil, 2012.

VOLPI, A., “ Mahout – Aprendizado de Máquina na Era do Big Data”. Apache Mahout, Brasil, 2015

WANG, K.; LI, J.; ZHANG, S.; QIU, Y.; “Time-Frequency Features Extraction and Classification of Partial Discharge UHF Signals”. In: Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE), International Conference on (Volume:2), Sapporo, Japão, 2014

WANG, K.; LI, J.; ZHANG, S.; LIAO, R.; WU, F.; YANG, L.; LI, J.; “A Hybrid Algorithm Based on S Transform and Affinity Propagation Clustering for Separation of Two Simultaneously Artificial Partial Discharge Sources”. In: Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (Volume:22 , Issue: 2), 2015

WARREN, V., Kantardziski, P., Lima, D.G., “Critérios Para Comparação De Testes De Descargas Parciais Entre Geradores E Sugestões Para Valores Limites”. No XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, Brasil, 1999

Weis, S.M., Indurkha, N., “Predict Data Mining”. Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1999

ZHONG, Z.W., LI, X.; THONG, K.W.; ZHOU, J.H.; “Characterization of Partial Discharge Signals”. In: Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Qingdao, China, 2010

ZUBEN, F.J.V.; Attux, R.R.F., “Árvores de Decisão”. Notas de Aula DCA/FEEC/Unicamp, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2010.