



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Avaliação de Diagnósticos de uma Máquina
Elétrica por Descargas Parciais

Igor de Sousa Medeiros Torres

Dissertação de Mestrado

Salvador – Bahia
2021

Avaliação de Diagnósticos de uma Máquina Elétrica por Descargas Parciais

Igor de Sousa Medeiros Torres

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Fernando Augusto Moreira

Orientador

Edson Guedes da Costa

Orientador

Salvador – Bahia

2021

de Sousa Medeiros Torres, Igor
Avaliação De Diagnósticos de Uma Máquina
Elétrica Por Descargas Parciais/ Igor de Sousa
Medeiros Torres. - Salvador-BA, 2021. **81f.** : il

Orientador: Fernando Augusto Moreira.
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade
Federal da Bahia, UFBA, 2021.

1. Descargas Parciais. 2. Máquinas Elétricas. 3.
Aquisição e Tratamento de Dados. 4. Análise de
Filtros. I. Augusto Moreira, Fernando. II.
Título.

Avaliação de Diagnósticos de Uma Máquina Elétrica Por Descargas Parciais

Igor de Sousa Medeiros Torres

Aprovada em: 28 de julho de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira

Orientador / UFBA

Documento assinado digitalmente



EDSON GUEDES DA COSTA

Data: 13/06/2022 09:08:01-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Edson Guedes da Costa

Orientador /UFCEG



Prof. Dr. Eduardo Furtado de Simas Filho

Membro Interno/UFBA



Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira

Membro Externo/UFS

AGRADECIMENTOS

À UFBA (Universidade Federal da Bahia) pela oportunidade oferecida, principalmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).

Aos professores pelo apoio e conhecimento repassado.

Aos meus familiares pelo incentivo, principalmente aos meus pais Geni de Sousa e José Torres, que sempre incentivaram meus estudos, a minha noiva Isabel Amorim, pela compreensão e apoio no decorrer do mestrado.

Aos orientadores Prof^{os} Dr. Fernando Moreira e Edson Guedes, por todo o conhecimento repassado, pelo apoio, compreensão e pela orientação durante todo o mestrado.

Ao Laboratório de Microeletrônica do DEE que gentilmente cedeu parte dos equipamentos necessários para esse trabalho.

Às gerências de Manutenção, Operação e Gerência da Planta da Usina Termelétrica Termobahia pela disposição às diversas tratativas necessárias e alocação de recursos para executar o teste de variação de potência necessário para a coleta dos dados.

E aos gigantes que lançaram as bases da ciência e ajudaram a construir os blocos de conhecimento que tornaram possível hoje esse trabalho.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.”

Nikola Tesla

RESUMO

As descargas parciais são fenômenos transitórios que ocorrem usualmente envolvendo uma porção isolante submetida a campo elétrico e imersos em um meio gasoso. O nível dessa atividade tem sido correlacionado nos últimos anos ao estado dos materiais isolantes empregados em sistemas elétricos. Particularmente, no segmento das máquinas elétricas, as descargas parciais podem prover informações cruciais para o monitoramento do estado operacional do equipamento trazendo informações sobre a presença de defeitos no isolamento, sua evolução e até mesmo localização. Por se tratarem de sinais que ocorrem, majoritariamente, na casa dos MHz, a captura, tratamento e interpretação das informações são complexas, demandando sistemas de aquisição e computadores robustos para filtrar o ruído e componentes de frequência indesejada dos sinais, preservando as características relevantes para análise. Em posse dessas informações, é possível utilizar a literatura normativa para, mediante comparação, avaliar qual a característica observável do sinal em questão e buscar apontar a localização aproximada de um eventual defeito. Este trabalho discorre sobre uma análise comparativa de três formas de filtragem de dados de descargas parciais e compara seu desempenho final com um diagnóstico conhecido de um objeto de teste real. Para que esse objetivo seja alcançado, foi realizada uma coleta de sinais de descargas parciais online de um gerador que possuía os capacitores de acoplamento instalados nos terminais da máquina. Os dados brutos foram então tratados por software com a remoção de componentes de frequência indesejadas e eliminando-se eventual presença de ruídos. Usa-se então essa gama de informações para classificar os defeitos baseados no formato dos gráficos e sua referência normativa. Por fim, de posse de cada diagnóstico sugerido para cada modalidade de filtragem, as informações são comparadas com a situação real da máquina que foi aberta para manutenção aproximadamente 6 meses depois da coleta dos dados. O método desenvolvido neste trabalho pode auxiliar valorosamente no estudo, análise e tratamento dos dados de descargas parciais, buscando prover outros mecanismos de separação das informações relevantes para o analista que irá compilar os dados e fazer o diagnóstico do estado da máquina partindo de informações confiáveis.

Palavras-chave— Descargas Parciais, Filtros Digitais, Máquinas Elétricas, Geradores.

ABSTRACT

Partial discharges are transient phenomena that usually occur involving an insulating portion subjected to an electric field and immersed in a gaseous environment. The level of this activity has been correlated in recent years to the state of the insulating materials used in electrical systems. Particularly in the segment of electric machines, partial discharges can provide crucial information for monitoring the condition of the equipment, bringing data on the presence of failures in the insulation, its evolution and even location. As these are signals that mostly occur in the MHz range, the capture, treatment and interpretation of information are complex, requiring robust acquisition systems and computers to filter out noise and components of unwanted frequency of the signals, preserving the relevant features for analysis. In possession of this information, it is possible to use the normative literature to, by comparison, assess which is the behavior observed in the signal in question and seek to point out the approximate location of a possible fault. This work discusses a comparative analysis of three partial discharge data filtering mechanisms and compares its final performance with a known diagnosis of a real test object. In order to achieve this goal, an online partial discharge signal collection was performed from a generator that had the coupling capacitors installed on the machine terminals. The raw data was then treated by software by removing unwanted frequency components and eliminating any presence of noise. This package of information is used to classify failures based on the shape of the graphs and their normative reference. Finally, in possession of each suggested diagnosis for each filtering modality, the information is compared with the actual situation of the machine that was opened for maintenance approximately 6 months after data collection. The method developed in this work can assist in the study, analysis and treatment of the data of partial discharges, trying to provide other mechanisms of separation of the relevant information for the analyst who will compile the data and make the diagnosis of the state of the machine starting from reliable information.

Keywords— Partial Discharges, Digital Filters, Electric Machines, Generators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama Esquemático detalhando os componentes do Turbogenerador Alstom Modelo 60WY23Z-109 instalado na UTE Termobahia.	20
Figura 2 - Rotor do Gerador Alstom Modelo 60WY23Z-109.....	21
Figura 3 - Condutores e meio isolante entre eles.....	25
Figura 4 - Representação da distribuição de cargas na cavidade.....	25
Figura 5 - Representação da capacitância em um isolamento elétrico com um defeito.	26
Figura 6 - Gráfico da ocorrência de descarga parcial em uma cavidade	26
Figura 7 - Esquemas de Teste em paralelo e em série com o objeto de teste.....	28
Figura 8 - IEEE 1434 - Característica triangular do padrão de DP para descargas em ranhuras	30
Figura 9 - IEC 60034-27-2: Representação das descargas em ranhuras.	33
Figura 10 - Sinal coletado em capacitor de acoplamento sem nenhum tratamento.....	34
Figura 11 - Filtro de Chebyshev Ordens 2, 4 e 8.	37
Figura 12 - Transporte do Gerador do Porto de Aratu (2001), em Salvador (BA), para instalação na planta.....	44
Figura 13 - Enclausuramento do Gerador.....	45
Figura 14 - Dutos de barra de saída do neutro do gerador.....	45
Figura 15 - Tampas do gerador Lado-Não-Acoplado (LNA).....	46
Figura 16 - Capacitor instalado por link flexível à conexão de saída do gerador com o duto de barras.	46
Figura 17 - Ligação com a saída do gerador	47
Figura 18 - Caixa de medição.....	48
Figura 19 - Osciloscópio ligado à caixa de medição mediante cabo coaxial.	49
Figura 20 - Vista do Osciloscópio durante coleta.....	51
Figura 21 - Curva de Capabilidade do Gerador de 300MVA.....	52
Figura 22 - Sinal bruto sem tratamento	54
Figura 23 - Tratamento de uma amostra.....	55
Figura 24 - Sinal filtrado para uma amostra	56
Figura 25 - Padrões de DP e localização do defeito - IEC 60034-27-2.....	57
Figura 26 - Padrões e localização de defeito. IEEE 1434.....	58

Figura 27 - Resultado Thershold, Fase A, 4 MVar.....	60
Figura 28 - Resultado Thershold, Fase C, 4 MVar	60
Figura 29 - Resultado Wavelet, Fase A, 4 MVar	61
Figura 30 - Resultado Wavelet, Fase C, 4 MVar.....	62
Figura 31 - Resultado IIR, Fase A, 4 MVar	63
Figura 32 - Resultado IIR, Fase C, 4 MVar.....	63
Figura 33 - Resultado Thershold, Fase A, 84 MVar.....	64
Figura 34 - Resultado Thershold, Fase C, 84 MVar.....	65
Figura 35 - Resultado Wavelet, Fase A, 84 MVar	66
Figura 36 - Resultado Wavelet, Fase C, 84 MVar	66
Figura 37 - Resultado IIR, Fase A, 84 MVar	67
Figura 38 - Resultado IIR, Fase C, 84 MVar	68
Figura 39 - Da esquerda para direita, excitatriz a escovas de carvão e mancal.....	75
Figura 40 - Cabeças de bobina da máquina com a presença nítida de óleo.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Avaliação Térmica e Designação	23
Tabela 2 – Dados de Placa do Gerador.....	43
Tabela 3 – Forma Construtiva	47
Tabela 4 – Primeiro Patamar de Carga (PC1) – Dados Gerais.....	50
Tabela 5 – Patamar de Carga 2.....	53
Tabela 6 – Diagnósticos verificados.....	69
Tabela 7 – Resumo dos resultados do patamar de carga 4MVar	71
Tabela 8 – Resumo dos resultados do patamar de carga 84MVar	73

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
GHz	Giga Hertz
kV	Quilovolt
pF	Picofaraday
nF	Nanofaraday
pC	PicoCoulomb
mV	Milivolts
V	Volts
MHz	Megahertz
MW	Megawatt
Pn	Potência nominal
Sn	Potência aparente nominal
Um	Tensão nominal
In	Corrente nominal
$\cos \varphi$	Fator de Potência nominal
Fn	Frequência
nn	Rotação nominal
Tcg	Temperatura do ar de entrada
h	Altitude
Ifo	Corrente de campo do gerador sem carga tensão nominal
Ufo	Tensão de campo do gerador sem carga tensão nominal
Ifn	Corrente de campo nominal em carga nominal
Ufn	Tensão de campo nominal em carga nominal
Zn	Impedância nominal
H	Constante de Inércia
Ptot	Perdas totais
η	Eficiência máxima em potência nominal
MVA	MegaVoltAmpère – Potência aparente
G/s	Giga-samples/segundo
GB	Gigabyte
Hz	Hertz
MVAr	Mega Volt Ampère Reativo
MB	Megabyte
ms	milissegundos
dV/dt	Taxa de variação da tensão no tempo

LISTA DE ABREVIACÕES

CA	Corrente Alternada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IEC	International Electrotechnical Commission
DP	Descargas Parciais
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
CD	Coupling Device (dispositivo de acoplamento)
CC	Connections Cable (cabos de conexão)
MI	Measuring Instrument (Instrumento de medição)
IEEE	International Electrical and Electronics Engineers
IIR	Infinite Impulse Response
FIR	Finite Impulse Response
FFT	Fast Fourier Transform
VPI	Vacuum Pressurized Impregnation
GVPI	Global Vacuum Pressurized Impregnation

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	15
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA	16
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	18
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 Aspectos Construtivos de Máquinas Elétricas	20
2.1.1 Componentes Mecânicos	20
2.1.2 Características dos Isolamentos	22
2.2 Descargas Parciais.....	23
2.2.1 Mecanismo de Ocorrência	24
2.2.2 Formas de Detecção.....	27
2.3 Normatização	29
2.3.1 IEEE Standard 1434-2014	29
2.3.2 IEC 60034-27-2	31
2.4 Filtros	33
2.4.1. Filtro por <i>Hard-Threshold</i>	34
2.4.2 Filtros de Resposta à Frequência	35
2.4.2.1 Filtros FIR.....	36
2.4.2.2 Filtros IIR	36
2.4.3 Filtros por Transformada Wavelet	37
CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
3.1 Técnicas de Filtragem.....	39
3.2 Interpretação de Resultados	40

CAPÍTULO 4	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1.1	MATERIAIS.....	42
4.1.1.1	Gerador.....	42
4.1.1.2	Capacitores.....	46
4.1.1.3	Captura da forma de onda e recursos computacionais	48
4.2	METODOLOGIA	49
4.2.1.1	Coleta de Dados.....	50
4.2.1.2	Tratamento das Informações	53
4.2.2.1	Thereshold.....	54
4.2.2.2	Wavelet	55
4.2.2.3	Filtro IIR.....	56
4.3	Análise Comparativa	57
CAPÍTULO 5	RESULTADOS	59
5.1	Primeiro Patamar de Carga: 4 MVAr.....	59
5.1.1	Thereshold	59
5.1.2	Wavelet	61
5.1.3	IIR Chebyshev.....	62
5.2	Segundo Patamar de Carga: 84 MVAr.....	64
5.2.1	Thereshold.....	64
5.2.2	Wavelet	65
5.2.3	IIR Chebyshev	67
CAPÍTULO 6	Análise e Comparação	69
6.1	Análise	69
6.2	Comparação	75
7	CONCLUSÃO	77
	Referências	79

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

As máquinas elétricas e o início da disseminação do uso da energia elétrica como força motriz para os modos de produção foram alguns dos grandes marcos da 2ª Revolução Industrial na segunda metade do século XIX. A versatilidade dessas máquinas, seja para atuarem como geradores ou motores, de diferentes capacidades, produção e manutenção mais simplificados que os sistemas a vapor elevaram esses equipamentos a protagonistas em praticamente qualquer ambiente industrial e presentes nos mais variados processos.

O emprego de máquinas elétricas de grande porte possui relevância vital para os processos produtivos aos quais estão vinculadas. Um dos maiores prejuízos causados pelos chamados *apagões* são devido à cessão de potência para motores elétricos que desempenham processos muitas vezes irreversíveis. Na indústria petroquímica, por exemplo, a interrupção operacional implica na necessidade de reinicializar a produção mediante o descarte de grande inventário de produtos que perdem a especificação dado o distúrbio no processo produtivo. Apenas o desligamento geral de 2013, no nordeste do Brasil, causou um prejuízo de R\$ 385 milhões (O GLOBO, 2013). Já o evento ocorrido em 2018 gerou impactos para mais de 70 milhões de pessoas (G1, 2018).

Em função de sua relevância, tanto para a execução dos processos das indústrias de transformação, tanto para os sistemas de geração de energia, é crucial realizar avaliação periodicamente desses ativos. O acompanhamento permanente garante o melhor e mais seguro desempenho operacional das máquinas. Nesse contexto, a manutenção preditiva apresenta excelentes resultados na associação de custo e resultados.

A manutenção preditiva de um equipamento se inicia com a realização de testes para a verificação das condições de funcionamento de seus componentes (MILASCH, 1983). Para os geradores elétricos, um dos fatores limitantes da capacidade de geração é a habilidade de realizar troca térmica da máquina dada a circulação de elevadas correntes pelos enrolamentos que geram aquecimento. A capacidade de geração seria virtualmente infinita de uma máquina se não houvesse os efeitos danosos que o excesso de calor pode provocar nos materiais de aplicação em especial as resinas que impregnam os condutores de cobre, associados também à

mica e Nomex[®]. Associados, compõem os dielétricos da máquina, também conhecidos como materiais isolantes.

Neste contexto dois parâmetros são cruciais no monitoramento de máquinas elétricas rotativas: vibração mecânica e isolamento. Dentre todos os parâmetros que se podem monitorar nos equipamentos industriais, sem dúvida os sinais de vibração são os mais usuais. Este fato se deve ao grande número de máquinas rotativas e aos elevados índices de retorno que este tipo de monitoração alcança. A aplicação sistemática de programas de monitoração de vibrações em máquinas rotativas pode gerar, em grandes plantas, um retorno dez a cinquenta vezes o montante investido no primeiro ano de operação (GARCIA, 2005).

Contudo, o monitoramento por vibração é insuficiente para determinar o estado operacional dos isolamentos de uma máquina elétrica. O isolamento elétrico caracteriza-se pela habilidade do material de minimizar o fluxo de corrente por um determinado meio.

Esse parâmetro, em especial nas máquinas elétricas, varia com a própria ação da vibração no tempo, com a aplicação de campos elétricos intensos e com as variações térmicas decorrentes do regime operacional.

A ação da vibração e do calor são capazes de provocar microfissuras no isolamento da máquina em razão do *stress* ao qual o material é submetido, sendo esse efeito acumulativo ao longo do tempo. A submissão ao calor, durante regime operativo, leva também a um processo de degeneração térmica. Esses materiais passam por processos de deterioração química e vão se tornando ressecados, perdendo o poder isolante (BUGARELLI, 2006) .

Através da atividade de descargas parciais, os campos elétricos intensos aos quais o isolamento de uma máquina é submetido, em especial os equipamentos de alta tensão, potencializam as microfissuras e também as microcavidades intrínsecas do próprio processo fabril. O envelhecimento do isolamento elétrico está então correlacionado à ocorrência de descargas parciais e à degradação térmica do material.

Dado o aspecto construtivo dos motores e geradores, muitas vezes as espiras encontram-se submetidas a esforços dielétricos intensos e fisicamente próximas a potenciais diferentes (fase – fase) ou próximos à carcaça (fase – terra). Assim, um bom isolamento é fundamental para garantia da confiabilidade operacional ao longo do tempo.

Além do envelhecimento natural a que todos os materiais estão sujeitos, o processo de fabricação também pode inserir defeitos nos isolamentos que, muitas vezes, são impossíveis de se evitar. O material isolante, então, possuindo microcavidades, seja oriunda do processo de fabricação ou do envelhecimento natural, e associado a um esforço elétrico, pode gerar

descargas parciais. Esse fenômeno ocorre no interior da cavidade contendo outro meio dielétrico diferente do isolante (por exemplo, ar), e quando submetido a um esforço dielétrico diferenciado, leva então a um acúmulo de cargas nas extremidades dessa cavidade. Por fim, quando o acúmulo se torna intenso, a ponto de criar um campo elétrico capaz de romper a rigidez dielétrica do ar, ocorre o fenômeno da descarga parcial.

Esse fenômeno ocorre em todo meio isolante que possua pequenos defeitos e sua ocorrência, apesar de indesejada, é esperada. No entanto, com o passar dos anos em operação a atividade de descargas parciais vai ficando mais intensa, uma vez que as microcavidades vão se expandindo com o tempo, seja pela ação da descarga, seja pela ação dos esforços mecânicos e térmicos oriundos do regime operacional ou mesmo condições atípicas não planejadas que tenham inserido uma falha com elevado potencial de propagação.

O nível de atividade de descargas parciais pode então ser utilizado como um mecanismo indireto de avaliação do estado geral do isolamento de uma máquina elétrica, podendo diagnosticar defeitos incipientes ou mesmo indicar uma expectativa de vida útil aproximada do conjunto.

Todavia mesmo o fenômeno sendo razoavelmente conhecido, o avanço da tecnologia computacional das últimas décadas tornou possível estudá-lo de forma mais contundente. No entanto, a depender do tipo de característica observada, os sinais podem surgir em variados espectros de frequência por conta de sua origem física, muitas vezes contaminados por elevados níveis de ruído. Separar a informação relevante para o diagnóstico tem se demonstrado um verdadeiro desafio.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar o desempenho da ferramenta de diagnóstico utilizando-se de sinais de descargas parciais na avaliação do estado operacional de máquinas elétricas. Para tanto, compara-se o resultado entregue por três modalidades de filtragem dos sinais. O diagnóstico será então correlacionado ao estado real de um gerador elétrico de uma planta termoeletrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os diferentes mecanismos de ocorrência de descargas parciais em máquinas elétricas já normatizados;
- Analisar os diferentes tipos de filtros de sinais de descargas parciais e aplicá-los em dados reais;
- Analisar resultados dos dados tratados e compará-los com diagnósticos executados por um fabricante consolidado;
- Realizar avaliação definitiva dos resultados obtidos mediante avaliação física da máquina após inspeção interna nas cabeças de bobina.

1.3 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

Apresentar os resultados de um estudo comparativo dos mecanismos de tratamento de sinais de descargas parciais e avaliar sua aderência à realidade física.

Os diferentes mecanismos de ocorrência de descargas parciais podem se manifestar em diferentes espectros de frequência e com uma variada gama de formas de onda, onde a região de ocorrência dos pulsos indicará qual tipo de fenômeno está acontecendo. Uma vez que essa resposta varia de máquina para máquina, é importante observar que o filtro utilizado para tratar o sinal bruto e extrair a informação é vital na preservação da porção relevante da informação. O estudo de caso mostrará também a correlação entre o diagnóstico elaborado baseado em cada um dos mecanismos de tratamento do sinal utilizados e a situação real encontrada na máquina, associando por fim teoria e prática.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em cinco capítulos e encontra-se estruturada da seguinte forma:

No **capítulo 2** é apresentada a fundamentação teórica, abordando a forma construtiva das máquinas elétricas e o fenômeno das descargas parciais, bem como o processo normativo relacionado à aquisição dos dados e os possíveis diagnósticos. Ademais, serão apresentados os três mecanismos de filtragem abordados durante o tratamento dos dados.

No **capítulo 3** realiza-se a revisão bibliográfica com os principais trabalhos relacionados a escolhas e análises realizadas ao longo do estudo de caso.

No **capítulo 4** apresenta-se o estudo de caso com os materiais e métodos, registros das variáveis coletadas e características do ensaio executado.

No **capítulo 5** apresentam-se os casos em cada patamar de carga obtido bem como o resultado da filtragem para cada ensaio de carga e tipo de filtro utilizado e apresenta-se o diagnóstico.

No **capítulo 6** apresenta-se a análise dos dados obtidos e compara-se com a avaliação física da máquina.

No **capítulo 7** dispõe-se as conclusões do trabalho seguido das referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aspectos Construtivos de Máquinas Elétricas

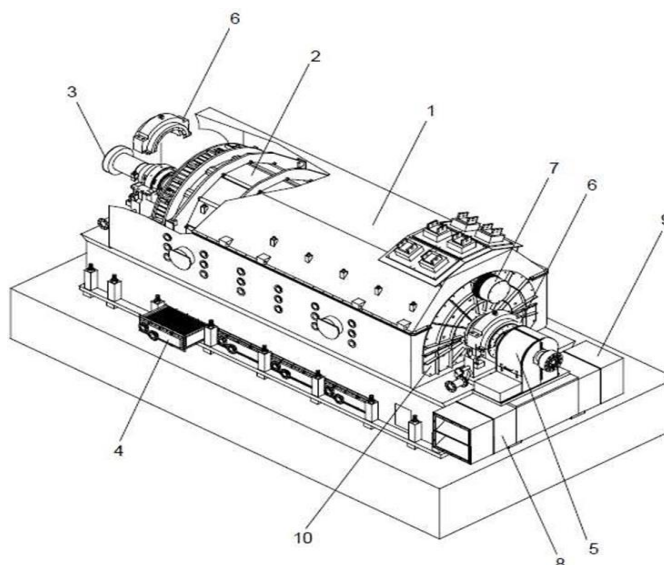
As máquinas CA tradicionais classificam-se em duas categorias: síncronas e de indução. Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas através de contatos rotativos fixados diretamente na parte estacionária do motor. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio de uma combinação da variação, no tempo, de correntes no estator e do movimento do rotor em relação ao estator (FITZGERALD, 2008).

2.1.1 Componentes Mecânicos

Os principais componentes de máquinas elétricas são o estator e o rotor, constituídos por bobinas de cobre, isolamento elétrico e sistema de resfriamento, além dos mancais.

Na FIGURA 1 pode ser visto um diagrama esquemático de gerador detalhando os seus componentes. A depender do tipo de tecnologia, agrega-se ainda resistências de aterramento, dutos de barras de conexão, sistemas de excitação, além de instrumentação como termopares, transformadores de corrente e potencial e sistemas de monitoramento.

Figura 1 – Diagrama Esquemático detalhando os componentes do Turbogenerador Alstom Modelo 60WY23Z-109 instalado na UTE Termobahia.

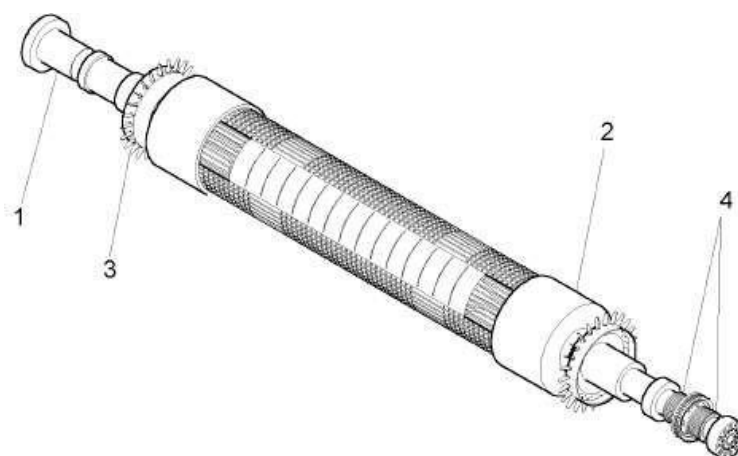


1-Carcaça Superior, 2-Estator, 3-Rotor, 4-Resfriamento Ar-Água, 5-Excitatriz, 6-Mancais, 7-Filtro de Ar de Entrada, 8-Coletor de Resíduos de Carvão das Escovas, 9-Sistema de Resfriamento da Excitatriz, 10-Tampa das Cabeças de Bobina. Fonte: Alstom, 2003.

O estator é composto pela estrutura, núcleo e enrolamento do estator. O enrolamento é fixado em fendas no núcleo do estator. As cabeças de bobina (enrolamentos terminais) são sustentadas por um sistema flexível e ajustável de aperto. No lado não acoplado, as barras terminais são montadas no terminal de conexões de onde são conduzidas 6 conexões de barramentos direcionadas à carcaça superior do gerador formando os terminais da máquina. Folhas de aço com baixas perdas elétricas são utilizadas para empilhamento e formação do núcleo do estator (ALSTOM, 2003).

O corpo do rotor é trabalhado com uma única forja em razão dos elevados esforços mecânicos durante operação não admitirem emendas. Fendas axiais de seção retangular são usinadas na superfície do rotor para suportar o enrolamento. Cunhas transversais nas áreas dos polos equalizam a rigidez contra torções em todos os eixos de seção do rotor. O enrolamento consiste em condutores ocos de cobre e são fixados com cunhas nas fendas. Em ambos os lados do rotor, as cabeças de bobina são cobertas por anéis de retenção, fixados ao corpo do rotor. O contato elétrico entre o enrolamento do rotor e os anéis coletores é realizado por uma barra conectora de corrente. Ventiladores são montados em ambos os lados do rotor para fins de refrigeração (ALSTOM, 2003). O diagrama esquemático do rotor e a descrição de seus componentes pode ser conferido na FIGURA 2.

Figura 2 - Rotor do Gerador Alstom Modelo 60WY23Z-109.



1-Corpo do Rotor, 2-Anéis de Retenção, 3-Palhetas de Ventilação, 4-Anéis Coletores.

Fonte: Alstom, 2003.

2.1.2 Características dos Isolamentos

O isolamento elétrico tem como função primordial segregar os diferentes potenciais elétricos de um material de sorte que a circulação de corrente elétrica entre eles seja mínima. Não obstante, para as máquinas elétricas o material empregado no isolamento é um fator crucial para determinação da vida útil de um ativo dessa natureza.

O comportamento da falha do isolamento é, sobretudo probabilístico, uma vez que, a tensão de ruptura do meio isolante pode variar independentemente se eles forem realizados em amostras isolantes idênticas. Em geral, o processo de disrupção do meio dielétrico depende de vários fatores, como magnitude, forma de onda, duração, polaridade, distribuição do campo elétrico, tipo e estado físico do meio isolante (ZANETTA, 2003).

Ao ser submetido a uma diferença de potencial, um campo elétrico é aplicado ao meio dielétrico, levando à ocorrência do fenômeno da polarização, onde cargas elétricas presentes na estrutura do material (em nível atômico e molecular) deslocam-se sem necessariamente liberá-las.

Os fenômenos devidos à polarização de um dielétrico podem ser estudados por meio do valor da constante dielétrica, pelo ângulo de perdas dielétricas e, se a polarização vem acompanhada de dissipação de energia que provoca o aquecimento do dielétrico (MAURO, 2015).

Para que apresentem desempenho adequado à aplicação em máquinas elétricas, os materiais a serem utilizados na isolação de condutores, barras e estruturas de suporte precisam que suas características de rigidez dielétrica, alta resistividade e baixas perdas sejam equilibradas com as necessidades de desempenho mecânico e térmico. Portanto, o material empregado precisa ser robusto o suficiente para elevados esforços elétricos e termodinâmicos. A aplicabilidade do isolamento para máquinas elétricas para operar com esforços térmicos variados é classificada conforme a tabela de avaliação térmica da ABNT NBR IEC 60085:2012, replicada a seguir na Tabela 1.

Tabela 1. Avaliação térmica e designação.

Classe	Temperatura Máxima Admissível em Serviço
Y(O)	90°C (algodão, seda e papel sem impregnação)
A	105°C (algodão, seda e papel com impregnação)
E	120°C (alguns vernizes, esmaltes e fibras)
B	130°C (mica, asbesto com aglutinante, EPR)
F	155°C (mica, fibra de vidro com aglutinante)
H	180°C (elastômeros de silicato)
C	>180°C (porcelana, vidro, quartzo, cerâmicas)

A maior parte das máquinas elétricas de grande porte tem classe entre E, B, F e H. A suportabilidade térmica demanda pelas classes de equipamentos maiores, destinados à geração para grandes consumidores, possui designação de classe usualmente entre a F e a H. Esse nível de compatibilidade com a temperatura se faz necessário em decorrência das elevadas correntes que circulam através das máquinas face à potência demandada. A capacidade de geração de uma máquina é então, muitas vezes, limitada à suportabilidade de temperatura dos materiais utilizados em sua construção.

Os sistemas de isolamento constituídos à base de mica, material inorgânico de origem mineral, possuem elevada estabilidade térmica e característica isolante. No entanto, no processo de fabricação faz-se necessário o uso de diversas resinas orgânicas para aglutinação dos materiais e preenchimento de vazios. Esse tipo de material orgânico é susceptível a diversos fenômenos como a despolimerização, fratura, endurecimento, formação de gases e distribuição não homogênea dos esforços térmicos, levando à possibilidade de existência de pontos quentes. É atuando nesse tipo de material que o fenômeno das descargas parciais pode vir a ser prejudicial à máquina.

2.2 Descargas Parciais

As descargas parciais são descargas elétricas localizadas que curto-circuitam parcialmente determinadas regiões do material isolante do equipamento (IEC 60270, 2000). Apesar de ser um fenômeno conhecido desde a primeira metade do século passado, apenas com as melhorias tecnológicas na aquisição de sinais nas últimas décadas foi possível desenvolver

equipamentos com a resolução suficiente para coletar os sinais de descargas parciais e hoje investe-se maior esforço em como tratar e interpretar os dados obtidos. No entanto, é preciso, primeiro, compreender como os eventos acontecem.

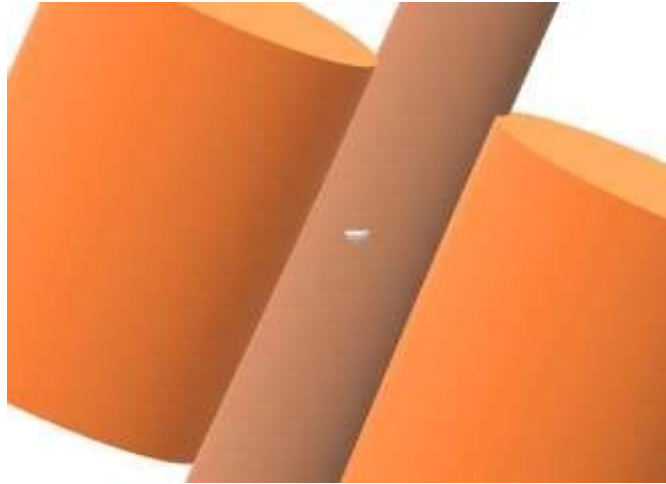
Na maior parte das máquinas elétricas CA, existem diversas fontes potenciais de DPs. Design da máquina, materiais de construção, métodos de construção, condições operacionais e práticas de manutenção podem afetar profundamente a quantidade, localização, características, evolução e significância das DPs (IEEE Std 1434).

O estator de geradores e motores com tensão nominal de 6 kV e acima, usualmente apresentam DPs em operação, porém materiais como mica e fibra de vidro são resistentes a DPs e são utilizados para mitigar seus efeitos. No entanto, a experiência tem mostrado um aumento significativo de atividade de DPs com o tempo pode reduzir o tempo de vida útil da isolamento dos enrolamentos do estator (STONE; STRANGES, DUNN, 2016).

2.2.1 Mecanismo de Ocorrência

Descargas parciais são descargas elétricas que curto-circuitam parcialmente a isolação. Essas descargas podem aparecer em cavidades gasosas, em meio isolante sólido ou líquido, ou ao longo de uma superfície ao redor de pontas. As descargas parciais em gases, em torno de um condutor, são conhecidas como “corona”. As descargas parciais são decorrentes da ionização de uma determinada região do dielétrico. A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende da forma do eletrodo, das características do dielétrico e da tensão aplicada. Devido à não-uniformidade do campo elétrico, pequenas regiões do isolamento podem ser submetidas a solicitações superiores à sua rigidez dielétrica, resultando em descargas parciais (COSTA; NEVES, 1996).

Para ilustrar a ocorrência do fenômeno, o desenho representativo da FIGURA 3, a seguir, representa um pequeno extrato de uma seção com dois condutores de cobre segregados por um meio isolante entre eles, representado pela barra de cor marrom. Há, no interior desse isolamento, uma cavidade que representa uma imperfeição inerente do processo fabril do material.

Figura 3 - Condutores e meio isolante entre eles

Fonte: Autor

Nesse contexto, supõe-se que os condutores se encontram energizados com níveis de tensão distintos, sendo o potencial elétrico do condutor do lado esquerdo maior que o do lado direito. Diante dessa realidade, as cargas elétricas existentes na cavidade interna ao material isolante, preenchido por ar, acumulam-se nas extremidades dessa cavidade formando um campo elétrico mais intenso nessa microrregião.

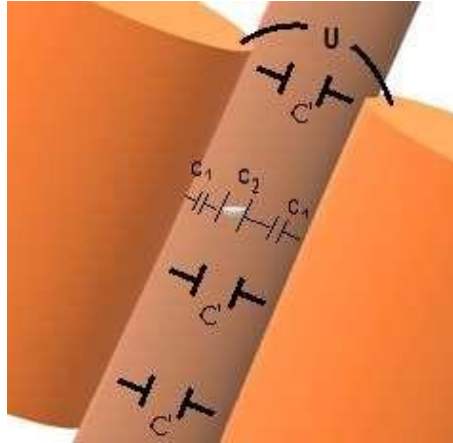
Figura 4 - Representação da distribuição de cargas na cavidade.

Fonte: Autor

A depender da composição do gás que preenche a cavidade, seu formato geométrico e a intensidade do campo elétrico criado pelo acúmulo de cargas nas extremidades do material, conforme exemplo da FIGURA 4, pode haver energia acumulada suficiente para que ocorra a quebra do meio dielétrico com a consequente avalanche disruptiva de elétrons de uma extremidade a outra da cavidade. O fenômeno cessa imediatamente após a equalização das cargas e daí vem sua nomenclatura. Essas descargas não são sustentáveis, ocorrem parcialmente e cessam logo depois da ruptura do meio dielétrico.

Pode-se estudar o efeito das descargas parciais mediante a representação de um circuito equivalente. A FIGURA 5 representa a situação descrita na FIGURA 3, porém com a representação de capacitâncias vinculadas ao material isolante aplicado entre as partes condutoras.

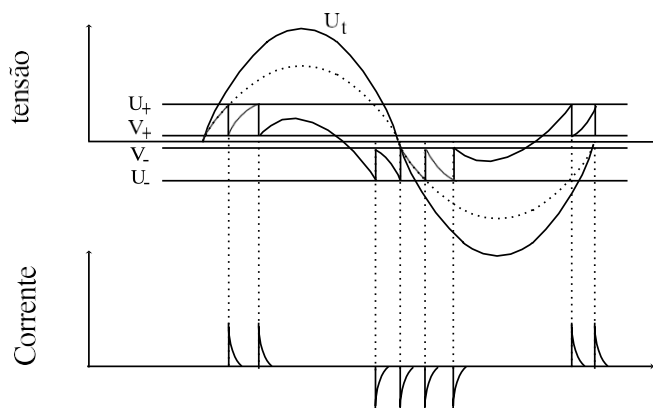
Figura 5 - Representação da capacitância em um isolamento elétrico com um defeito.



Fonte: o autor.

O circuito representativo lista como capacitância equivalente do conjunto não afetado pela cavidade a variável C' . Já C_1 representa a capacitância série com a cavidade, ao passo que C_2 representa a capacitância dessa cavidade. Uma vez que C_2 é diferente de C_1 , haverá na região da cavidade uma tensão diferente das tensões sobre C_1 . Sendo U a diferença de potencial entre condutores, U_+ (U_-) a tensão disruptiva da cavidade e V_+ (V_-) a tensão residual na cavidade após a descarga, o gráfico da FIGURA 6 representa uma senóide de tensão aplicada à amostra. Verifica-se, portanto, a característica pulsante do sinal de descargas parciais.

Figura 6 - Gráfico da ocorrência de descarga parcial em uma cavidade.



Fonte: (Costa; Neves, 1996)

A migração de cargas pode gerar aquecimento e eventual carbonização dos elementos orgânica que compõem o isolamento, levando a um crescimento dessa cavidade e intensificação do fenômeno uma vez que cavidades maiores com caminhos preferenciais carbonizados levariam a mais descargas parciais culminando enfim num defeito do isolamento.

Dessa forma, o estudo e compreensão das descargas parciais é vital para entender sua ação sob os equipamentos do sistema elétrico e assim, tornar possível a adoção de medidas preventivas ao invés de corretivas, evitando prejuízos e inconvenientes para os operadores e usuários do sistema.

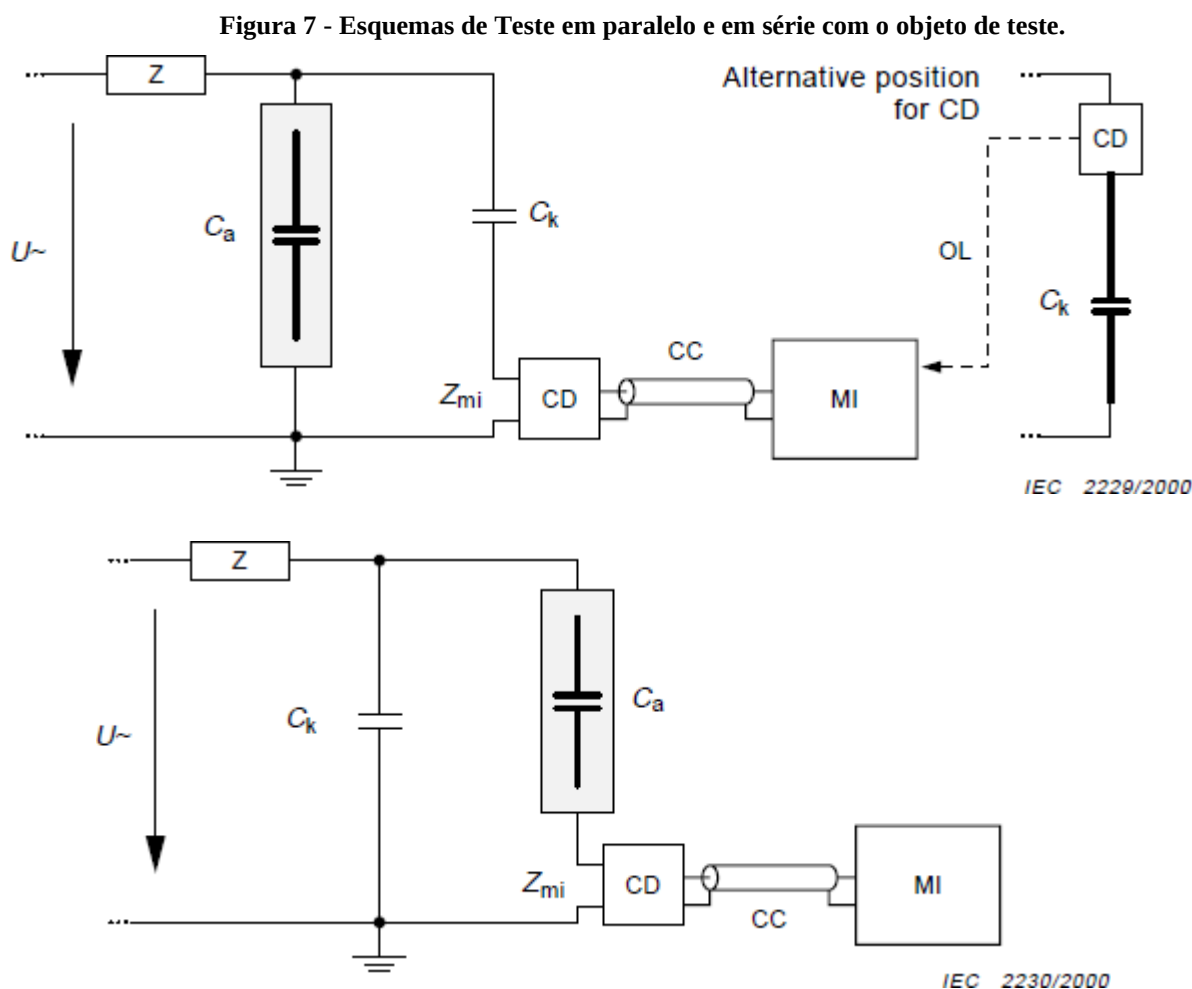
2.2.2 Formas de Detecção

As primeiras instalações usadas para reconhecimento de defeitos nocivos de DPs foram pontes de Schering combinadas a osciloscópios, onde a sensibilidade de detecção era comparativamente baixa. Um substancial progresso foi feito nos anos 20 quando os primeiros receptores do tipo 'superheterodyne' com amplificadores de banda estreita tornaram-se disponíveis. Os requisitos para tais instrumentos desenhados para detecção de DPs foram primeiramente especificados nos EUA em 1940, quando a NEMA publicou o padrão "Methods for Measuring Radio Noise", que posteriormente foi revisada para "Methods of Measurement of Influence Voltage of High Voltage Apparatus", emitida em 1964. (HAUSCHILD; LEMKE, 2014).

Foi somente em 1968, quando a IEC publicou a norma 270, que houve a distinção entre as descargas parciais e os efeitos acústicos típicos que envolvem equipamentos energizados em alta tensão e o efeito corona. Nessa primeira edição foram introduzidos vários conceitos como a carga aparente, medida em Coulombs, bem como as tensões onde se iniciam e se extinguem os pulsos de DP.

A própria IEC 60270, em sua versão mais atual, de 2001, sugere arranjos de testes para a coleta dos sinais de DP, sejam eles em sistemas analógicos ou, preferencialmente, digitais. Para tal, define-se o objeto de teste como um meio isolante detentor de uma capacitância C_a , C_k para um capacitor de acoplamento padrão com design que ofereça o mínimo de indutância e, por fim, uma impedância oriunda de um sistema de medição. Ademais, é imperativo que exista uma fonte de alta tensão que ofereça o mínimo possível de ruídos de fundo para evitar falsos positivos.

Os arranjos para os ensaios podem ser de duas maneiras, a depender da posição dos capacitores. Eles podem ser dispostos tanto em série como em paralelo, conforma a representação da FIGURA 7 a seguir.



O modo em paralelo é o mais utilizado. Legendas: Z – impedância; C_k – capacitor padrão; C_a – representação do objeto de teste; CD – coupling device (dispositivo de acoplamento – conectores); CC – connection cable; MI – measuring instrument.

Fonte: IEC 60270, 2000.

Existem também estudos que buscam quantificar o nível de atividade de descargas parciais baseadas nos ruídos ultrassônicos emitidos pelos equipamentos utilizando-se de captadores de sinais na banda dos GHz. Notadamente esse domínio de frequência exige elevado esforço computacional intenso uma vez que os períodos dos sinais envolvidos rodeiam a casa dos nano segundos e os conversores Analógico/Digital precisariam ter um período de aquisição

compatível com essa característica.

2.3 Normatização

Complementares à IEC 60270 e sua correlata, a IEEE Std 4 de 2013, existem outras normas que buscam, usando os conceitos preestabelecidos por essas normas, auxiliar na interpretação dos dados oriundos dos sinais de descargas parciais.

2.3.1 IEEE Standard 1434-2014

A IEEE 1434 estabelece diversos mecanismos de detecção de descargas parciais que vão além da medição direta de correntes de alta frequência filtrada por capacitores como a medição por sensores de rádio frequência, variações no fator de potência da máquina, acúmulo de energia e transferência de carga, detecção de ozônio, detecção acústica e de ultrassom, teste de black-out e câmeras de corona.

Cada uma dessas técnicas suplementares possui mecanismos indiretos de detecção do fenômeno das DP's, porém todas são susceptíveis a contaminação de ruído ou ainda não são difundidas como aplicações para uma solução industrial.

A grande contribuição da IEEE 1434 vem dos *layouts* experimentais e de soluções permanentes de coleta de dados de DP's e a sua padronização. Um número considerável de sistemas de sensibilização ao pulso está em uso. O design da máquina e a atividade de DP's pode definir o tipo de sensor e a forma de instalação requerida. Quando um pulso de DP acontece em alguma localização do enrolamento, a carga injetada primeiramente direciona-se à capacitância para a terra no local de aplicação, modificando, pois, a tensão local. Essa rápida mudança de tensão imediatamente transforma-se em uma frente de onda que propaga-se em ambas as direções partindo do local de aplicação. Uma vez que o tempo de subida do pulso de DP pode ser na escala dos nanosegundos, a onda da tensão inicial possui frequências que vão dos megahertz aos gigahertz (IEEE Std 1434).

A norma apresenta 14 cenários de medições *online* de DP com as mais variadas formas de detecção, entretanto a grande maioria está relacionada à medição direta mediante acopladores capacitivos, propondo valores de 80 pF a 10 nF.

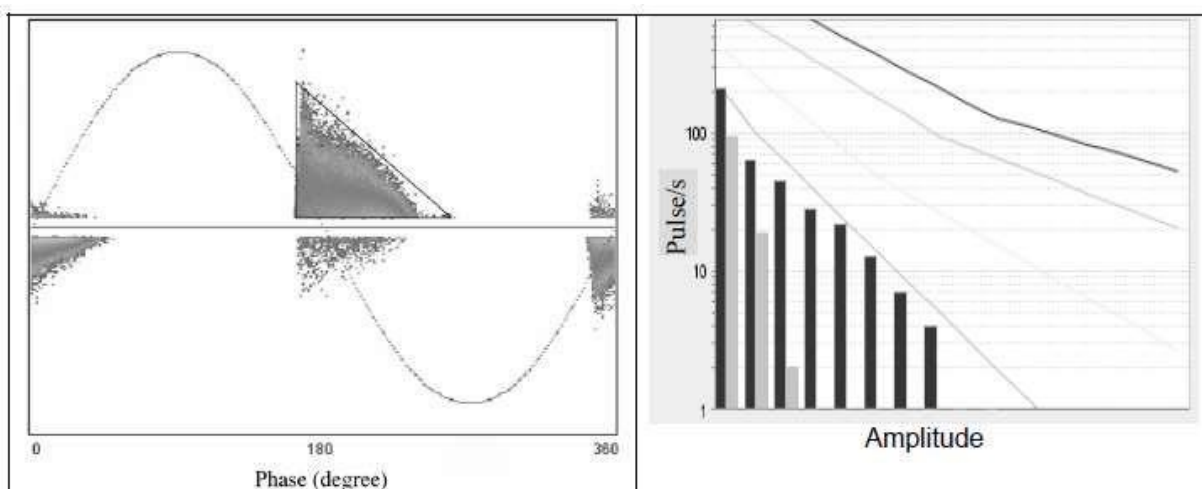
A medição *off-line*, com a máquina parada, oferece 6 propostas de medição, sendo a maior parte para medição direta com tensão aplicada por fonte externa e mecanismos de compensação da

capacitância da máquina com grandes indutores externos. Embora com boa precisão, esse método, amplamente utilizado, impõe custos de execução cada vez mais altos a depender do porte da máquina, uma vez que os indutores se tornam fisicamente grandes e precisam ser móveis para se deslocarem entre diferentes instalações.

Para a interpretação dos resultados, a norma tipifica 3 tipos de descargas características como objeto de interesse. Um exemplo de gráfico de sinais de DP consta na FIGURA 8:

- Descargas em cavidades ou delaminações (separação de camadas) internas à isolação;
- Descargas entre o enrolamento/barras e o núcleo do estator, conhecidas como descargas em ranhura;
- Descargas nas cabeças de bobina.

Figura 8 - IEEE 1434 - Característica triangular do padrão de DP para descargas em ranhuras.



Fonte: IEEE 1434, 2014.

Em termos de dados quantitativos, a norma não especifica valores limitantes de atividades de DP para serem considerados aceitáveis ou dignos de atenção. É difícil definir um nível máximo permitido apropriado de DPs porque isso é frequentemente uma característica particular de um sistema de isolação e seu revestimento. No caso de sistemas de medição nos terminais da máquina, frequentemente medidos em milivolts na entrada do detector, ou carga aparente em picocoulombs, a largura de banda do sistema de detecção e as características de atenuação dos enrolamentos tem efeitos profundos na magnitude das DPs medidas.

Entretanto, ao estabelecer registros de vários ajustes de testes em sistemas de isolamento e configuração de enrolamentos, usando sistemas comuns de detecção, valores anormalmente altos de magnitude de DPs podem ser identificados (IEEE Std 1434). De fato, pode-se dizer que a qualidade dos dados produzidos pela análise de descargas parciais depende da base de dados do analista, bem como dos registros passados e o acompanhamento periódico da característica típica de descarga parcial de uma máquina ao longo do tempo.

2.3.2 IEC 60034-27-2

Diferentemente da norma IEEE, a IEC 60034-27-2 estabelece definições exclusivamente para os testes de descargas parciais online. Ademais, estabelece características típicas de modalidades de DPs como descargas internas, subdivididas em cavidades, delaminação interna e delaminação entre condutores com a isolamento e arborização elétrica. Outros tipos de DP são descargas em ranhuras, partículas condutivas e descargas nas cabeças de bobina, também subdivididas em superficiais e fase-fase. Há ainda a possibilidade de detecção de outros defeitos pela obtenção dos pulsos de DP, mesmo sendo outro fenômeno físico, como formação de arcos por contatos intermitentes devido à fissura de condutores e centelhamento oriundo de vibração.

A IEC 60034-27-2 estabelece alguns mecanismos para reconhecimento de padrões. Sejam eles manuais, com a análise de um especialista, ou por variados mecanismos de software, há um vasto campo de possibilidade de desenvolvimento de novas metodologias de diagnóstico de máquinas através dos padrões-ouro de modalidades de DP descritos na norma. No entanto, hoje, a interpretação dos resultados ainda carrega um fator de incerteza representado pela necessidade de intervenção humana para avaliação dos resultados.

Para os rápidos pulsos de DP com frequências elevadas, os enrolamentos do estator podem apresentar elementos onde ondas viajantes, capacitâncias complexas e acoplamentos indutivos e ressonância podem ocorrer. Portanto, o fenômeno de propagação do pulso de DP precisa ser considerado. Em razão da atenuação, distorção, reflexão e acoplamento cruzado de sinais de ondas viajantes, a forma e a magnitude de um sinal de DP capturada em uma determinada localização do sensor difere daquela de seu ponto de origem (IEC60034-27-2, 2012).

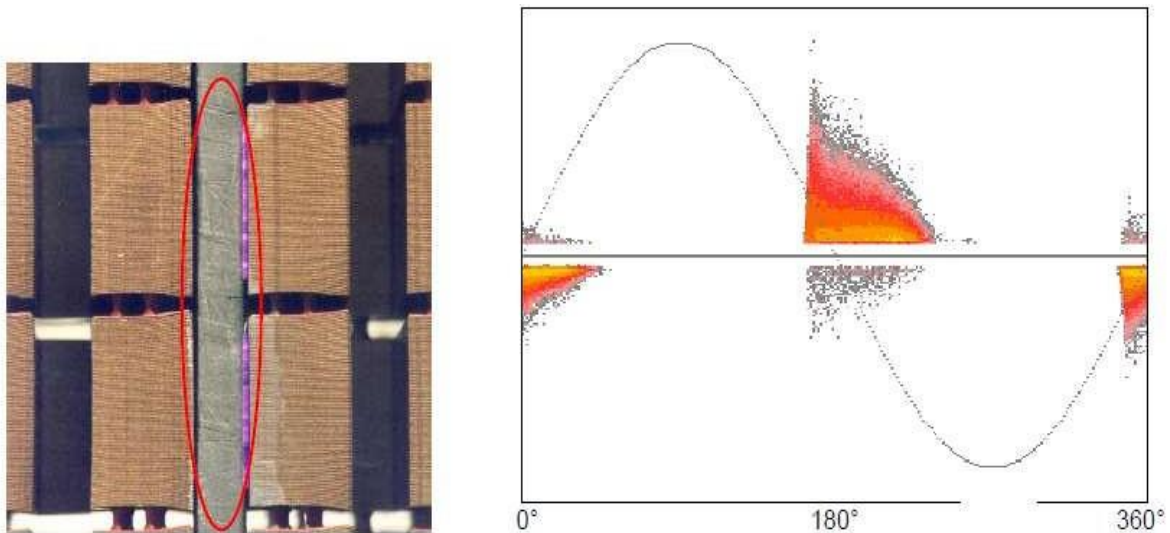
Diferentemente da norma IEEE, a IEC analisa porções do espectro de frequência onde é

mais facilmente detectável e quantificável a presença dos pulsos de DP. A detecção é então segregada em faixas até 3MHz, com valores em pC diretamente proporcionais à energia dos pulsos, porém com elevada contaminação de ruídos. Já a faixa de 3 a 30 MHz, apresenta boa relação sinal-ruído e valores de pulsos já não proporcionais à grandeza dos pulsos, recomendando então medição em mV do sinal. A última faixa de 30 a 300 MHz possui boa resposta de frequência para eventos de DP ocorridos próximos ao ponto de coleta (enrolamentos terminais da máquina onde a tensão é maior) e possui excelente resposta perante ruídos. Nas bandas baixas de frequência, o ruído é alto suficiente para suprimir a energia dos pulsos, dessa forma a medição torna-se pouco proporcional. As demais bandas de frequência superiores são melhor capturadas mediante o uso de antenas instaladas direcionadas para as cabeças de bobina das máquinas.

Em sequência a norma provê parâmetros e diretrizes para os sistemas de medição como a especificação mínima dos capacitores de acoplamento, posicionamento desses sensores junto às máquinas, dados de placa da máquina e ambientais para registro durante os testes e pontos operacionais de carga do gerador de sorte a se obter os padrões de DP em níveis distintos de stress provocados pela carga. Notadamente, quanto maior a carga em MW, maior a circulação de corrente e consequentemente a carga térmica no estator da máquina, sendo diretamente proporcional ao nível de atividade de descargas parciais.

Talvez as informações mais valiosas a serem extraídas da IEC 60034-27-2 estejam, na realidade, em seu anexo. Nesse trecho, a norma estabelece uma série de padrões de descargas parciais típicos, conforme exemplo da FIGURA 9, ensaiados e reproduzidos em laboratório, os quais o analista deverá buscar comparar para direcionar seu diagnóstico. Os padrões definidos de DPs são as descargas em cavidades, delaminação interna, delaminação entre condutor e isolamento, descarga em ranhuras e descargas em cabeças de bobina, subdividida em descargas superficiais nas camadas de tinta semicondutiva, arborização superficial e descargas entre o ponto energizado e a massa.

Figura 9 - IEC 60034-27-2: Representação das descargas em ranhura



Fonte: IEC 60034-27-2.

2.1 Filtros

Conforme foi possível constatar em ambas normas expostas anteriormente, existe uma grande preocupação quanto à contaminação dos sinais por ruídos provenientes do ambiente e dos sistemas associados ao processo da máquina que está sob teste. A própria presença de iluminação artificial pode ser um fator de introdução de interferências ao passo que o processo de chaveamento de eletrônica de potência, oriundas de *drives* ou excitação estática nos rotores do gerador, também podem contribuir negativamente para a relação sinal-ruído.

O local de coleta dos dados deve ser tratado de forma a mitigar a introdução desse tipo de interferência, de sorte que o mesmo seja estabelecido o mais próximo possível dos capacitores de acoplamento, respeitadas as condições de segurança para o acesso aos terminais de coleta pelos analistas.

Ainda que todos os cuidados prévios sejam tomados, a contaminação dos sinais por interferência é inevitável. Buscando-se mitigar esses efeitos, alguns mecanismos de filtragem dos dados de DP são empregados para garantir que o diagnóstico seja provido baseado apenas nas informações reais.

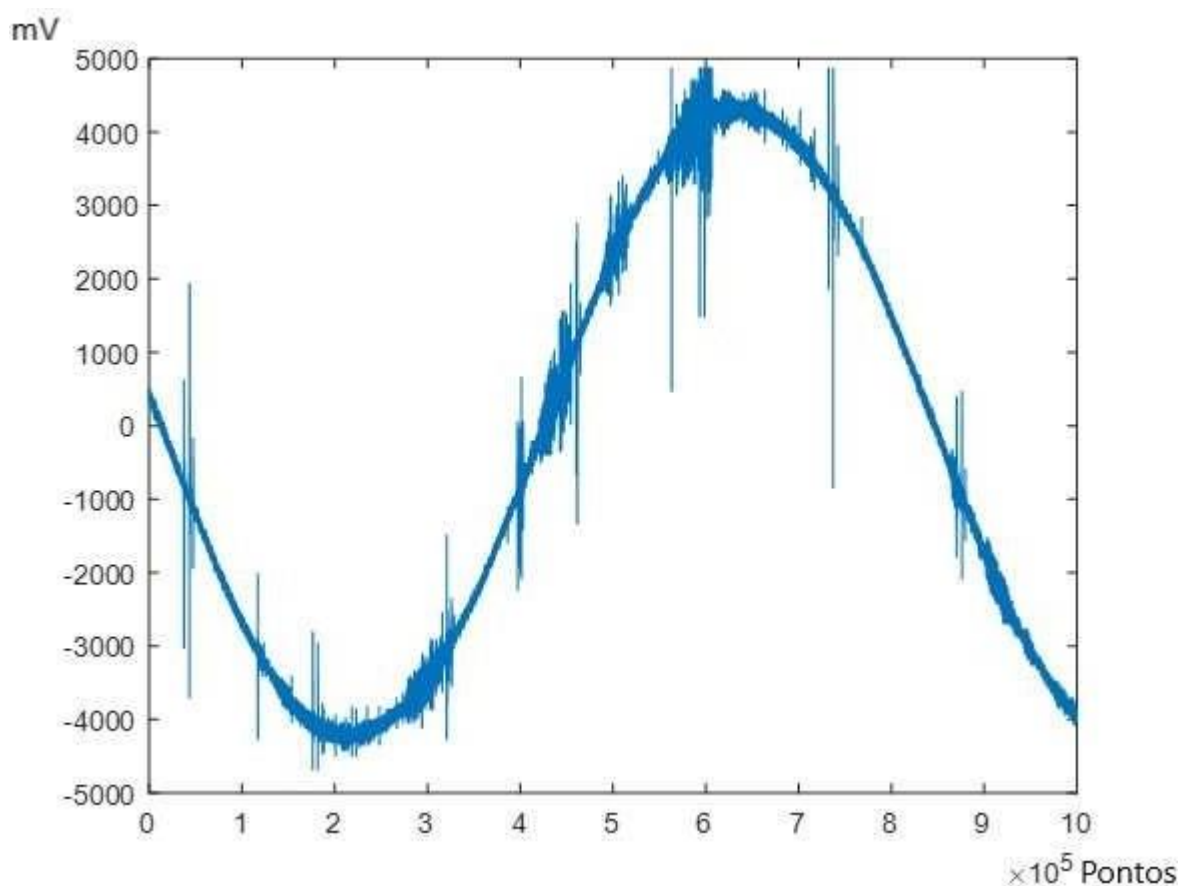
Com o avanço na resolução de computadores e conversores A/D velozes, a medição digital das DPs tornou-se uma realidade, e em breve, muitos métodos digitais de supressão de ruído evoluíram, como as médias móveis, limitação por FFT, filtros digitais (resposta infinita

ao impulso, IIR e resposta finita ao impulso, FIR), filtros adaptativos e, mais recentemente, as wavelets também (SATISH; NAZNEEN, 2003). Esse trabalho aborda alguns desses métodos.

2.1.1 Filtro por limiar (*Hard-Threshold*)

A extração dos dados por limiar (*hard-threshold*) se dá pela imposição de um fator limitante mínimo de sinal, após a segregação dos sinais por um filtro passa alta simples. A FIGURA 10 contém uma amostra de sinal de descarga parcial sem qualquer tratamento. Assumindo-se verdade que os sinais serão necessariamente contaminados por um nível básico de ruído do ambiente e das condições de processo, o mecanismo consiste em avaliar graficamente e separá-lo do patamar mínimo de onde estão ocorrendo as descargas parciais.

Figura 10 - Sinal de 20 ms coletado em capacitor de acoplamento sem nenhum tratamento.



Fonte: Autor

O mecanismo de tratamento por *threshold* pode levar à supressão de algumas informações eventualmente relevantes para a análise de DP e usualmente é empregado com extração das informações em tempo real, dado que seu cálculo exige pouco esforço computacional. Sendo $g(x)$ o sinal obtido e $a_m(x)$ a função referente ao *threshold*, sua função de transferência se dá da seguinte forma:

$$f(x) = g(x) \cdot a_m(x), \quad \text{onde}$$

$$a_m(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } |g(x)| \geq T \\ 0 & \text{se } |g(x)| < T \end{cases} \quad (1)$$

Isso implica na prática que o analista pode coletar os dados de DP e realizar a sintonia observando-se até que nível de informação é levada em consideração no diagnóstico. Duas preocupações são pertinentes a esse fenômeno: ao suprimir informações em demasia, o analista poderá ocultar dados relevantes ao diagnóstico e levar a um resultado falso. O mesmo pode acontecer se a presença de ruídos incluída na análise final for tal que a interpretação do *status* da máquina fique prejudicado. Para tal, a sintonia do fator T da Equação (1) deve ser tal que preserve a maior quantidade de informações relevantes e permita o mínimo de ruído. A decisão quanto à categorização entre o que é ruído e o que é informação, nesse caso, fica a cargo do analista e traz um fator de pessoalidade ao processo.

2.1.2 Filtros de Resposta à Frequência

Em diversas aplicações, é interessante mudar as amplitudes relativas dos componentes em frequência de um sinal ou talvez eliminar por completo alguns componentes em frequência, tal processo é conhecido como filtragem. Os sistemas que são projetados para deixar passar algumas frequências essencialmente não distorcidas e que atenuam significativamente ou eliminam outras são chamados filtros seletivos em frequência (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

Os filtros de resposta à frequência são componentes essenciais para a separação dos sinais de descargas parciais até mesmo da frequência fundamental para que possam ser analisados de forma segregada. Alguns dos tipos de filtros aplicáveis para captura das informações dos sinais de DP são os *Finite Impulse Response* (FIR) e *Infinite Impulse Response* (IIR).

Com respeito à resposta ao impulso, filtros podem ser classificados em dois tipos. Se

o sistema é implementado através de uma equação de diferenças que não contém termos recursivos (ou seja, a saída não é realimentada à entrada), então o filtro pode ser implementado diretamente através da convolução. Como a resposta ao impulso deve ser finita para ser implementável, esse tipo de filtro é chamado FIR. Outro tipo de filtro contém realimentação, ou seja, se a saída do filtro for $y[n]$, então ela depende, em maior ou menor grau, dos valores de suas amostras passadas $y[n-k]$. Esse tipo de filtro é chamado IIR (NALON, 2009).

2.1.2.1 Filtros FIR

Os filtros de resposta finita ao impulso, FIR, possuem ordem fixa e podem ser usados na obtenção de dados em uma determinada banda de frequência, buscando-se também suprimir sinais repetitivos oriundos da rede com filtros adaptativos.

Por razões da teoria de processamento de sinais, um filtro FIR de ordem ímpar (ou seja, um número ímpar de coeficientes) e simetria par dos coeficientes possui uma resposta em frequência nula para metade da frequência de amostragem (frequência de Nyquist). Isso não se dá por razões de supressão de distúrbios, mas por razões de processamento de sinal (KOPF; FASER, 1995).

Assim, para aplicações de filtragem de descargas parciais, esses filtros usualmente possuem ordem elevada. Na aplicação de (KOPF; FASER, 1995), foi empregado um filtro adaptativo de ordem 255. Nas aplicações atuais, é possível obter filtros de ordens 10 vezes menores com boa eficiência.

2.4.2.2 Filtros IIR

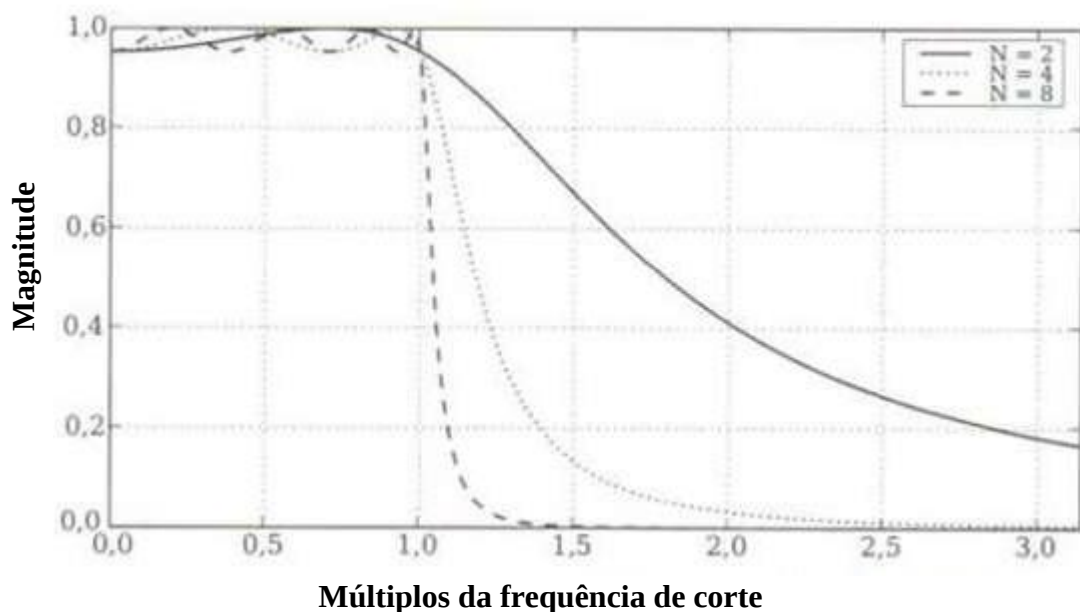
A principal vantagem dos filtros IIR sobre os filtros FIR é que eles tipicamente atingem as especificações com uma ordem muito inferior ao de um filtro FIR. Apesar dos filtros IIR possuírem fase não-linear, o processamento de dados de filtros IIR requer um número pequeno de multiplicações para implementar e podem não ser estáveis (SAINI; KAUR, 2015).

De forma abrangente, os métodos de obtenção de filtros digitais podem ser divididos em duas classes: não-recursivos e recursivos. Sendo que, os recursivos são também chamados de Filtros de Resposta Infinita ao Impulso. Um filtro IIR particularmente eficiente é o IIR *notch* (do inglês, encaixe). Nesse filtro, os zeros são projetados para permanecer num círculo unitário

(plano complexo) num ângulo igual à frequência de entrada que precisa ser rejeitada (NAJESH; GURUJAJ, 1993).

Outro design de filtros muito utilizado é o Chebyshev, podendo ser subdivididos no tipo 1 e tipo 2. A resposta em magnitude de um filtro Chebyshev tipo 1 é *equiripple* (ou seja, tem ondulações de mesma dimensão) na banda passante e monotônico na banda de rejeição. A magnitude de resposta de um filtro Chebyshev tipo 2 é monotônica na banda passante e *equiripple* na banda de rejeição (SAINI; KAUR, 2015). A função de transferência de um filtro Chebyshev pode ser observada na FIGURA 11.

Figura 11 - Filtro de Chebyshev Ordens 2, 4 e 8.



Fonte: (Nalon, 2009).

2.4.3 Filtros por Transformada Wavelet

A palavra *wavelet* tem como gênese a palavra francesa “*ondalette*”, que significa onda pequena.

As wavelets foram pela primeira vez mencionadas no apêndice da tese de Haar em 1909. As *wavelets* de Haar ficaram no anonimato por vários anos, até que nos anos 30 vários grupos trabalhando independentemente, pesquisaram a representação de funções usando uma base variando com a escala. Nas últimas duas décadas, a transformada *wavelets* tem sido satisfatoriamente aplicada a sinais de características não-estacionárias. Sua aplicação se destaca

em diferentes áreas como Engenharia, Física, Matemática, Estatística, Economia, etc. Podemos ressaltar a sua utilização em estatística, como um procedimento auxiliar na filtragem (*denoising*) (GUTIERREZ, 2002|).

As transformadas wavelets podem ser classificadas como contínuas (TWC – Transformada Wavelet Contínua) e discretas (TWD – Transformada Wavelet Discreta). As vantagens da transformada wavelet se concentram no fato desse tipo de transformada poder ser usada para decompor o sinal em diferentes escalas, tanto no domínio da frequência, quanto no domínio do tempo (CARNEIRO, 2019).

De forma análoga à Transformada de Fourier (TF), a transformada wavelet decompõe o sinal em questão em conjuntos apropriados de bases de funções. O nome indica que são pequenas ondas, ou ondeletas, em português, sugerindo que as wavelets são localizadas no tempo. Isso é uma diferença frente à TF, visto que essas bases são formadas de senos e cossenos infinitos. Ao contrário da TF, as wavelets decaem à zero quando $t \rightarrow \infty$ (YOUNG, 2012).

A equação matemática da transformada contínua wavelet de um sinal $f(t)$ é dada por

$$L\varphi f(a, b) \leq f, \varphi a, b \geq |a|^{-1/2} \int f(t) \varphi(t-b/a) dt \quad (2)$$

Onde $\varphi(t)$ é usualmente referenciada como a *wavelet* mãe (também chamada de função de base), o parâmetro ‘a’ é o fator de dilatação ou contração que determina a banda de frequência na qual o sinal será analisado e o parâmetro ‘b’ reflete a posição no faixa de tempo. a e b podem variar continuamente sobre R com a restrição de que $a \neq 0$. A transformada *wavelet* contínua, portanto, pode ser interpretada como uma representação no espaço de fases do sinal $f(t)$ e um contínuo seccionamento de $f(t)$ em sucessivas bandas de frequência (VIDYA; KRISHNAN, MALLIKARJUNAPPA, 2008).

Prover uma análise de descargas parciais de qualidade suficiente para a isolamento de um equipamento elétrico requer a utilização de ferramentas analíticas especiais. A natureza não estacionária de ocorrência do fenômeno físico reforça a necessidade de se conduzir testes simultâneos no domínio do tempo e da frequência (ZAJĄC; SUŁOWICZ, PETRYNA, 2018). A natureza das transformadas wavelet, preservando informações do domínio do tempo, especialmente os transitórios, é a característica que a torna mais atraente para sua utilização em descargas parciais.

CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre algumas pesquisas recentes na área de coleta de sinais de descargas parciais, o tratamento dado para os dados brutos, além dessa aplicação com algumas das técnicas adotadas nesse trabalho bem como a vinculação desses dados à análise de DPs em máquinas elétricas. Assim, o capítulo está dividido em três seções. A primeira seção aborda as técnicas de obtenção de sinais e filtragem e a segunda seção traz trabalhos focados no diagnóstico pela forma do sinal trabalhado após a filtragem. Por fim, na seção final destacam-se quais as contribuições esta proposta de dissertação pretende atingir.

3.1 Técnicas de Filtragem

No trabalho de Satish e Nazneen (2000), buscou-se desenvolver uma técnica de filtragem de sinais baseada em wavelet e compará-la com os melhores filtros FIR e IIR disponíveis na literatura. Os ruídos inseridos nos sinais de DP foram classificados em três tipos: interferência por espectro de radio-comunicação, pulsos periódicos oriundos de sistemas chaveados de potência e interferências estocásticas causadas por pulsos originados de centelhamento, efeito corona externo ou mesmo escovas de aterramento em máquinas rotativas.

Usando sinais gerados matematicamente, entre as três técnicas utilizadas, a IIR e *wavelet* apresentaram os melhores valores de correlação com o sinal pretendido após a filtragem. Utilizando sinais reais, os autores conseguiram bons resultados ao extrair sinais de DP de dados brutos altamente contaminados com ruído.

Focando em superar as dificuldades provocadas pela presença de ruídos e a existência de múltiplos defeitos característicos de Descargas Parciais, Ortego et al. (2020) apresentaram medições sincronizadas com um toróide capaz de capturar sinais de alta frequência e um capacitor de acoplamento conectado aos terminais de um gerador. As medições foram realizadas mediante três métodos: convencional conforme IEC 60270 e utilizando os toróides em bandas estreitas de frequência ou frequências na casa dos MHz aplicando-se filtros wavelet.

Os autores chegaram à conclusão de que há boa eficácia na aquisição de sinais de DP entre 0, 1 e 20 MHz tanto pela abordagem no método tradicional (por capacitores de acoplamento) quanto pelos toróides. A aplicação da técnica de *wavelet* foi decisiva para melhor obtenção do sinal.

Já Zajac et al. (2018) utilizam de *wavelets* para sinais provenientes de bobinas de Rogowski. Nesse caso, as *wavelets* são decompostas até o 12º grau usando polinômios ortogonais de Legendre de ordem 16º. Os autores verificaram que a maior parte da energia dos sinais concentra-se nos primeiros níveis de decomposição das *wavelets* e cai fortemente após o 6º nível de decomposição.

3.1 Interpretação de Resultados

David Natttrass (1988), publicou um artigo sobre medição e interpretação das descargas parciais bastante relevante. São realizados ensaios para tipificar a forma como as DPs ocorrem para diversas situações usuais onde defeitos podem ser encontrados na isolação, a exemplo de cavidades, fissuras, múltiplas bolhas de ar, defeitos com característica arbórea, e muitos outros.

Posteriormente o autor traz diversos exemplos de fontes de interferência que são potenciais ameaças à análise de DPs uma vez que podem levar a falsos positivos (ou negativos) no diagnóstico. São tipificados seis exemplos que passam pela interferência do efeito corona mediante a presença de um sistema energizado em alta tensão que ioniza o ar próximo aos pontos de maior concentração de campo elétrico, interferências por mau contato entre partes condutoras gerando um pequeno centelhamento que pode ser confundido com DP, além da presença de ruídos por ressonância entre elementos do circuito de medição, chaveamento de circuitos estáticos de eletrônica de potência e até mesmo a presença de lâmpadas fluoerescentes ou sinais de rádio podem ser potenciais contaminantes ao sinal de DP.

Por fim, o artigo de Contin et al. (2015) traz uma abordagem complementar aos padrões típicos de DPs apresentados nas normas IEC 60034-27- 2 e IEEE 1434. O trabalho busca particularizar os mecanismos de ocorrência de DPs para equipamentos elétricos que tenham sido fabricados com a técnica de Impregnação da Isolação por Pressão de Vácuo Global (do inglês, GVPI). Essa técnica de fabricação consiste em mergulhar todo o conjunto que precisa ser isolado em um tanque a vácuo para que a impregnação da resina isolante ocorra no material utilizado. Diferentemente das técnicas de VPI, a GVPI faz a impregnação de toda a máquina de uma única vez ao passo que a técnica tradicional faz a impregnação por trechos de isolação.

O trabalho segue com a apresentação das bobinas experimentais criadas e trabalhadas pelos autores no método de GVPI e alguns defeitos típicos foram propositalmente inseridos para análise do padrão de DPs. São então apresentados os resultados gráficos com os ensaios de DPs acumuladas no tempo e o respectivo perfil que apresentam, segregando em três tipos de resultados: múltiplos padrões de DP ocorrem com o mesmo tipo de defeito variando de acordo com a tensão aplicada e o grau de envelhecimento do objeto de teste, múltiplos padrões de DP causados por um mesmo tipo de defeito e vários mecanismos de envelhecimento e por fim um único padrão de DP pode estar associado a mais de uma topologia de falha.

Conclui-se por fim que formas construtivas distintas levam a padrões de DP distintas, levando a entender limitações do alcance dos padrões de DP propostos tanto pela norma IEC quando pela norma do IEEE.

3.2 Contribuições

O presente trabalho busca apresentar três mecanismos de tratamento dos dados brutos de DP, submetê-los a sinais obtidos de um equipamento em operação e então avaliá-los comparativamente a um diagnóstico obtido por ferramenta comercial e, principalmente, ao real estado da máquina após uma inspeção para manutenção.

Espera-se, com esse trabalho, apontar quais os mecanismos mais eficazes de tratamento dos sinais de DP oriundos do campo, sua correlação com situações reais, e sua aplicabilidade perante os esforços computacionais necessários.

CAPÍTULO 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de caso é uma estratégia de pesquisa que foca na compreensão das dinâmicas presentes em arranjos únicos. Eles tipicamente combinam coleta de dados e a evidência pode ser qualitativa, quantitativa ou ambos (EISENHARDT, 1989).

O caso a ser apresentado diz respeito a um gerador elétrico de uma usina termelétrica, localizada no Estado da Bahia, que opera seus processos com geração de dois produtos: energia elétrica e vapor. A energia é encaminhada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), ao passo que o vapor é encaminhado a uma refinaria de petróleo que utiliza o vapor em seus processos para realizar a destilação de petróleo e a consequente produção de derivados.

Operando há mais de uma década, a máquina em questão foi objeto de estudos em um projeto piloto da Alstom Power ®. O fabricante de equipamentos elétricos estava desenvolvendo solução própria de coleta e monitoramento de descargas parciais e fez a instalação dos sensores capacitivos na unidade, conforme requisitos da IEC 60034-27-2 (2012). O projeto, foi comissionado e as informações foram coletadas por duas ocasiões. O operador do ativo, no entanto, não prosseguiu com análises posteriores e o sistema caiu em desuso.

O sistema em questão foi então utilizado como fonte dos dados de sinais de descargas parciais do gerador elétrico deste trabalho para a então comparação do desempenho de três mecanismos de filtragem de descargas parciais e a consequente interpretação e diagnóstico do estado atual da máquina.

Nas sessões a seguir apresentaremos em mais detalhes os materiais e métodos aplicados neste trabalho.

4.1 MATERIAIS

Nessa seção serão apresentados os equipamentos utilizados tanto na coleta de dados, como o gerador elétrico e as especificações técnicas pertinentes à máquina.

4.1.1 Gerador

Fabricado entre 2000 e 2001, o gerador de 300 MVA segue normas construtivas da IEC e é de fabricação ABB-Alstom. As FIGURAS 12 a 15 consistem em registros fotográficos do equipamento. A seguir serão apresentados os dados principais da máquina.

Tabela 2 - Dados de Placa do Gerador (Alstom Power, 2001)

Dados principais do Gerador 60WY23Z-109	Símbolo	Valor	Unid.
Normatização		IEC	
Potência nominal	P_n	255	MW
Potência aparente nominal	S_n	300	MVA
Tensão nominal	U_m	21000	V
Corrente nominal	I_n	8248	A
Fator de Potência nominal	$\cos \varphi$	0.85	-
Frequência	F_n	60	Hz
Rotação nominal	n_n	3600	Rpm
Temperatura do ar de entrada	T_{cg}	40	°C
Altitude	h	10	M
Corrente de campo do gerador sem carga tensão nominal	I_{fo}	517	A
Tensão de campo do gerador sem carga tensão nominal	U_{fo}	91	V
Corrente de campo nominal em carga nominal	I_{fn}	1441	A
Tensão de campo nominal em carga nominal	U_{fn}	332	V
Impedância nominal	Z_n	1.470	Ω
Constante de Inércia	H	2.08	S
Perdas totais	P_{tot}	3782	kW
Eficiência máxima em potência nominal	η	98.68	%

Comprimento do núcleo do estator		5460	Mm
Diâmetro interno do núcleo do estator		1275	mm
Número de ranhuras		54	
Isolação das placas do núcleo	Verniz		
Classe de Isolação	F		
Material entre voltas das bobinas	Fibra de vidro enrijecida		
Sistema de Isolação Principal	Micadur		
Peso do Estator Completo		256	ton
Peso do Rotor Completo		59	ton
Peso total		336	ton

Figura 12 - Transporte do Gerador do Porto de Aratu (2001), em Salvador (BA), para instalação na planta.



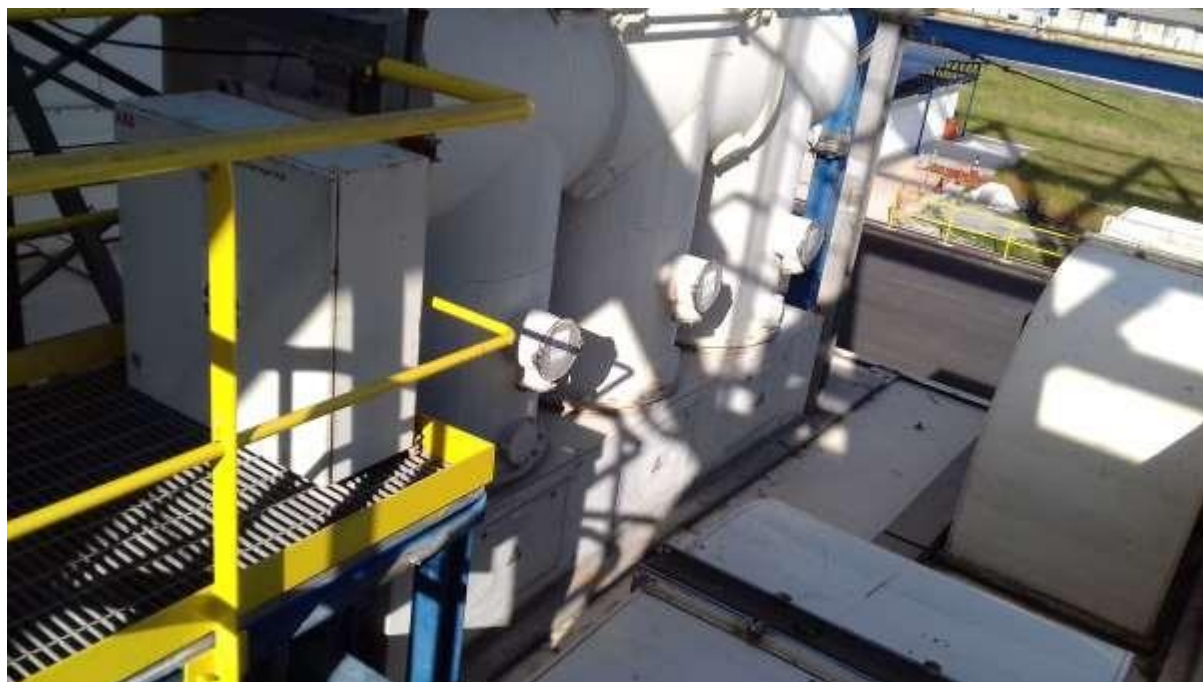
Fonte: Leopoldo Amaral Serviços Marítimos (internet).

Figura 13 - Enclausuramento do Gerador.



Fonte: Autor (2021). O enclausuramento do gerador serve tanto para proteção das intempéries quanto para mitigação dos ruídos durante regime operacional.

Figura 14 - Dutos de barra de saída do neutro do gerador.



Fonte: Autor (2021). À esquerda, encontra-se o painel de chegada dos sinais dos capacitores sensores de DP.

Figura 15 - Tampas do gerador Lado-Não-Acoplado (LNA).



Fonte: Autor (2021). À direita, excitatriz do rotor mediante escovas de carvão.

4.1.1 Capacitores

Os capacitores foram instalados como um projeto piloto durante o desenvolvimento de uma solução de coleta e análise de descargas parciais por parte de um fabricante, tendo sido instalado no início da década passada.

Figura 16 - Capacitor instalado por link flexível à conexão de saída do gerador com o duto de barras.



Fonte: Autor.

Os sensores instalados na máquina são de 9000 pF (ou 9 nF), conforme FIGURA 16, alinhando-se à estratégia construtiva nº 13 proposta pela IEEE 1434, replicada a seguir por conveniência:

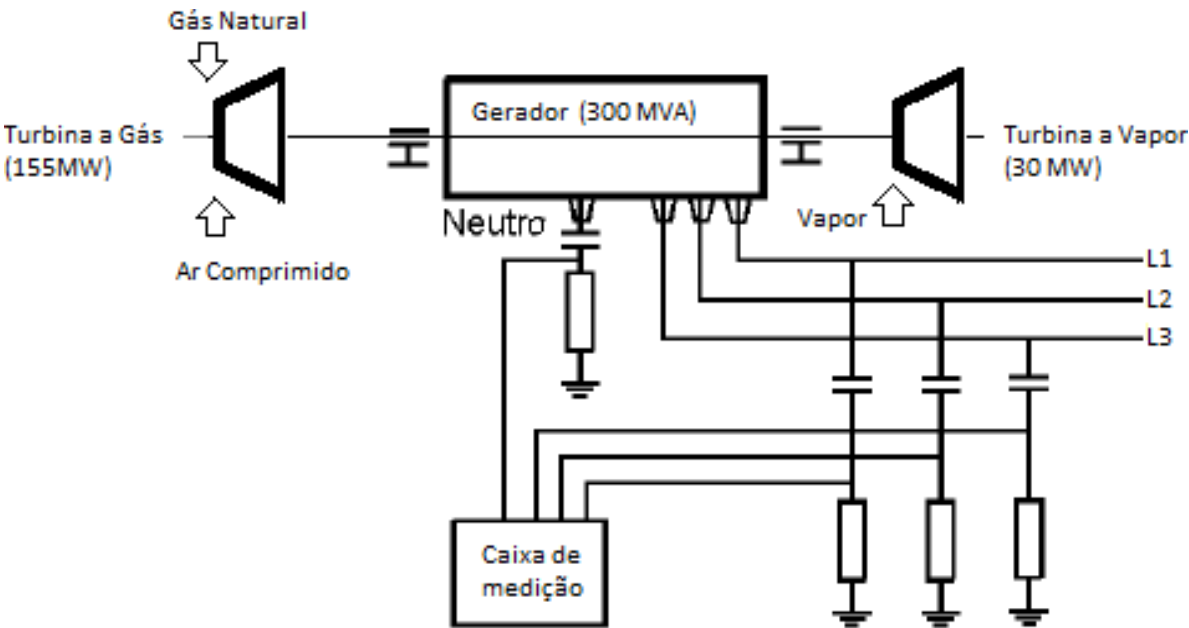
Tabela 3 – Forma Construtiva.

Case	Sensors	Detector/output	Frequency range	Noise rejection	Pros and cons
13	1 nF – 9 nF couplers terminated in 50 Ω have been well used for on-line PD testing. They are installed at line and neutral (optional).	Pulse magnitude and phase resolved graphs	100 kHz to 20 MHz	Filters and modern digital signal processing techniques.	Lower frequency allows detection of PD activity deeper into windings. Noise can be identified by experienced user.

Fonte: IEEE 1434, 2014.

A configuração acima, com a opção de instalação no neutro, foi a empregada para coleta das informações. Os capacitores são então conectados aos terminais da máquina junto aos links flexíveis de saída do gerador, em cada uma das fases, conforme o diagrama esquemático da FIGURA 17 a seguir.

Figura 17 - Ligação com a saída do gerador



Fonte: Autor.

Os cabos, do tipo coaxial e blindados, são conectados mediante uma derivação no lado de baixa tensão e são encaminhados até uma caixa de medição localizada em um painel próximo aos terminais da máquina, porém acessível de forma segura com a máquina em operação. Essa caixa pode ser conferida na FIGURA 18.

Figura 18 - Caixa de medição.

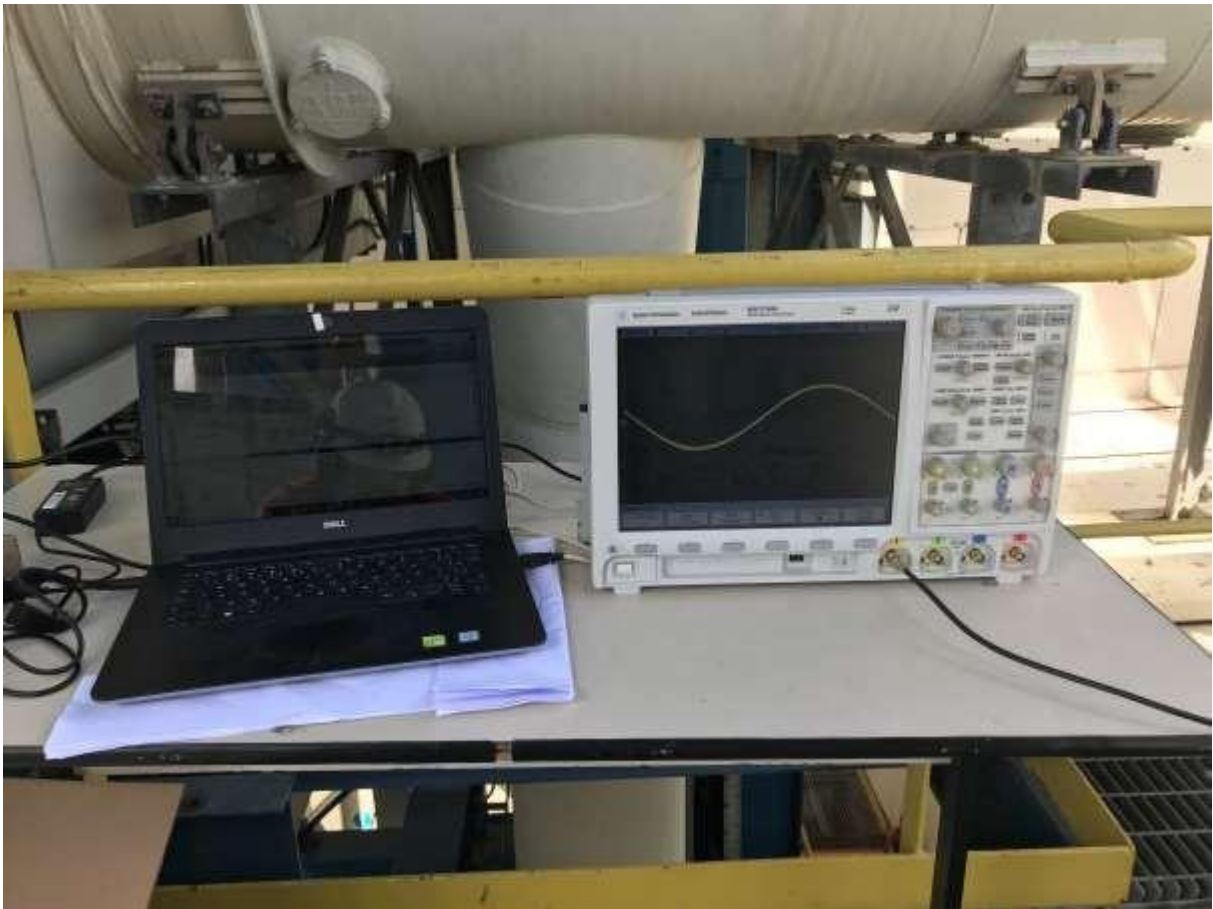


Fonte: Autor. Os conectores são do tipo TNC e recebem os sinais oriundos dos conectores. Dentro da caixa há um conjunto de impedâncias de 50 ohms para evitar reflexões do sinal.

4.1.1 Captura da forma de onda e recursos computacionais

Para realizar a leitura dos pontos foi utilizado um osciloscópio, gentilmente cedido pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, dotado de frequência de amostragem de 4 G/s e leitura de frequência de até 1 GHz da Agilent Technologies. Associado a esse osciloscópio, mediante conexão USB, foi utilizado um notebook com processador i7® e 16 GB de memória ram para armazenamento das informações. O registro dessa coleta pode ser verificado na FIGURA 19.

Figura 19 - Osciloscópio ligado à caixa de medição mediante cabo coaxial.



Fonte: Autor. O notebook está associado ao osciloscópio com uma rotina de captura através do Matlab ®.

Para o tratamento dos dados foi utilizado o software Matlab ® onde foram elaboradas rotinas de tratamento das informações com a separação dos sinais de alta e baixa frequência e o posterior filtro dessas componentes de alta frequência com uso de três filtros: threshold, filtro Chebyshev (IIR) e transformada wavelet.

4.2 METODOLOGIA

O mecanismo empregado na obtenção das informações, no contexto da análise de descargas parciais, pode ser separado em dois aspectos: A coleta dos dados e o tratamento das informações. A coleta diz respeito às variáveis do dia, do equipamento e da sistemática realizada na extração das informações do campo. Ao passo que a análise trata de aspectos do tratamento das informações no contexto computacional.

4.2.1 Coleta de Dados

As medições foram realizadas no dia 28/08/2018, no período da manhã, em aproveitamento à coleta de sinais de descargas parciais online que havia sido contratado pelo operador do ativo e estava sendo realizada de forma paralela. Uma amostra sendo coletada pode ser observada na FIGURA 20.

Para permitir a comparação com coletas anteriores, foram estabelecidos dois patamares de carga em potência reativa, dado que a variação de potência ativa não foi permitida pelo operador por razões comerciais, uma vez que a planta estava despachada por indisponibilidade.

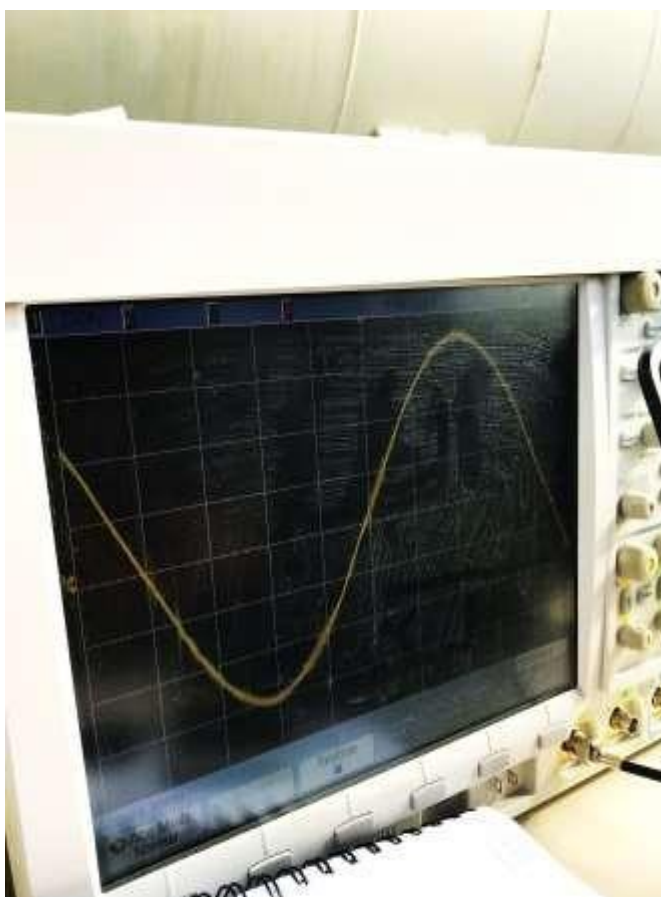
Dessa forma, o primeiro patamar de carga (chamaremos Patamar de Carga 1 – PC1), onde já se encontrava a máquina em regime permanente, era:

Tabela 4 - Primeiro Patamar de Carga (PC1) - Dados Gerais

PC1 – 4MVar	
Tensão [kV]	20,5
Frequência [Hz]	60
Corrente [A]	4519
Potência Ativa [MW]	160,8
Potência Reativa [MVar]	4
Fator de Potência	1,0
Temperatura média do estator [°C]	80

Nesse contexto, foram realizadas as coletas dos dados da seguinte forma:

- Cada coleta realizava a aquisição de pouco mais de 1 senóide completa (20ms), com 1 milhão de pontos, 100 vezes;
- Foram realizadas 10 coletas para cada fase, totalizando 1000 registros por fase;

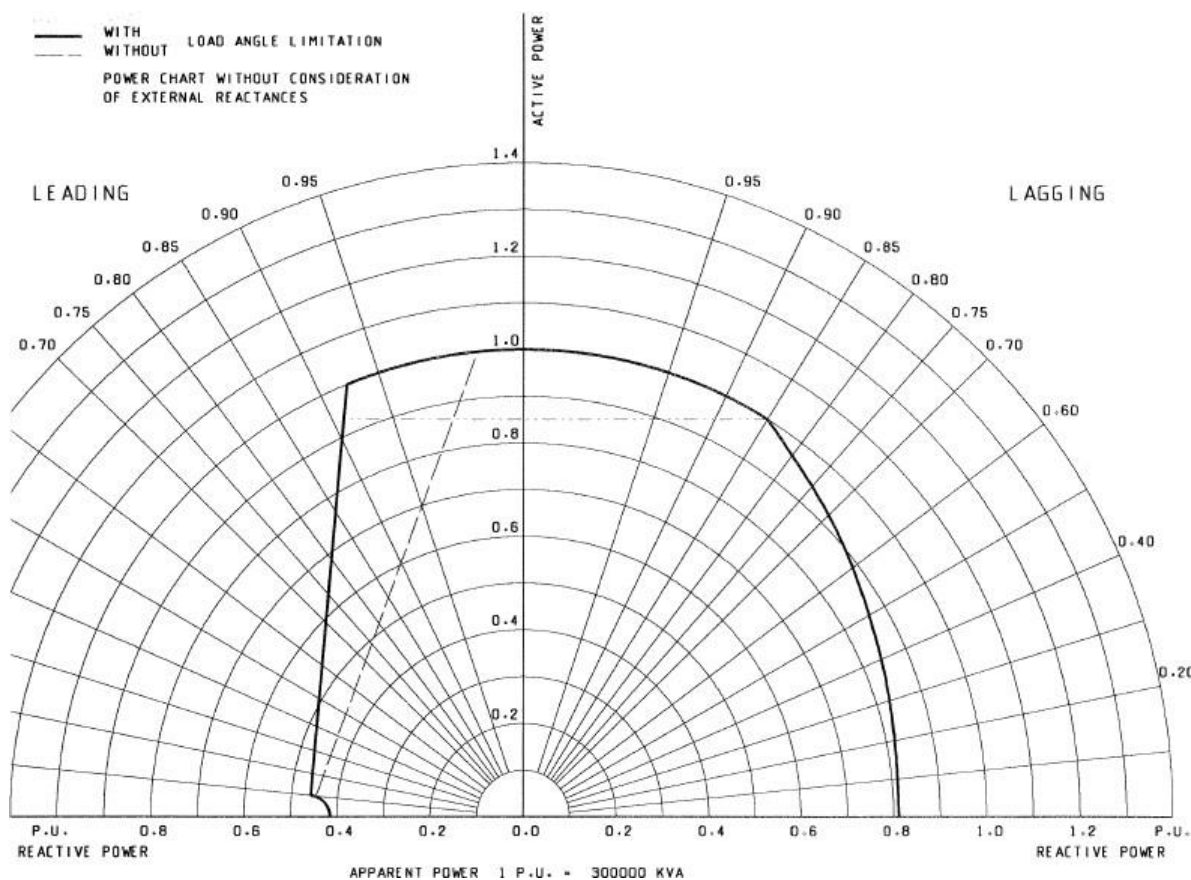
Figura 20 - Vista do Osciloscópio durante coleta

Fonte: Autor

Por razões operacionais não foi possível realizar a coleta do capacitor da fase B e do neutro. Não foram verificadas leituras provenientes desses pontos, indicando uma falha no circuito de medição.

Para o patamar de carga seguinte, elevou-se a geração de potência reativa ao máximo patamar possível. Esse teto é definido não somente pela curva de capacidade do gerador, representado na Figura 21, mas, principalmente, pelas condições operacionais do momento. Por ser uma máquina de porte considerável, o gerador em questão é utilizado rotineiramente como elemento de controle de reativo e tensão de barra para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), assim, a limitação pode se dar tanto pela variação de tensão na barra quanto por o quanto essa variação de tensão acaba por interferir localmente nos sistemas auxiliares da unidade, usualmente os barramentos de 480V e/ou inferior.

Figura 21 - Curva de Capabilidade do Gerador de 300MVA



Fonte: (ASEA BROWN BOVERI - ABB, 2000)

Assim, apesar de sinalizado na FIGURA 21 que o valor máximo de potência reativa alcançado seria de 0.8 pu (ou 240MVar), o limite de queda de tensão de 5% da tensão da rede ou aumento dessa tensão acabam por serem atingidos antes, impactando a carga máxima de reativos admitidos pelo operador da planta de forma segura. Nesse cenário, a exportação de reativo provocou uma variação de tensão da ordem de 5,85%, sendo o incremento de reativos suspensos pelo operador após esse patamar. Ademais, na última medição, o valor de reativos estava próximo a esse patamar, tornando-se mais valioso o diagnóstico comparativo com o relatório passado do que níveis de carga maiores. Assim, os dados foram obtidos no seguinte contexto do Patamar de Carga 2 (PC2):

Tabela 5 - Patamar de Carga 2.

PC2 – 84MVA _r	
Tensão [kV]	21,7
Frequência [Hz]	60
Corrente [A]	4860
Potência Ativa [MW]	162,4
Potência Reativa [MVA _r]	84
Fator de Potência	0,89
Temperatura média do estator [°C]	85

É digno de nota que a variação de potência ativa da planta se dá pelas condições de processo da máquina. No dia das medições, a planta, despachada por ordem de mérito, operava com valor de 165 MW. Isso implica uma produção de 280 ton/h de vapor de processo. No entanto, a principal preocupação do operador é na manutenção do patamar de vapor, ao passo que é permitido que ocorram flutuações na geração de energia, que ocorre em razão da variação de temperatura ambiente, que acaba impactando no fator de compactação do ar que será utilizado na queima do combustível.

4.2.2 Tratamento das Informações

Uma vez que foram realizadas 10 leituras na fase A e a fase C, tanto no patamar de 4MVA_r quanto no patamar de 84 MVA_r, foram então gerados 40 arquivos de sinais de DP. Cada um possuía de 60 a 80 MB de dados, o que totalizou mais de 2,91 GB de informações.

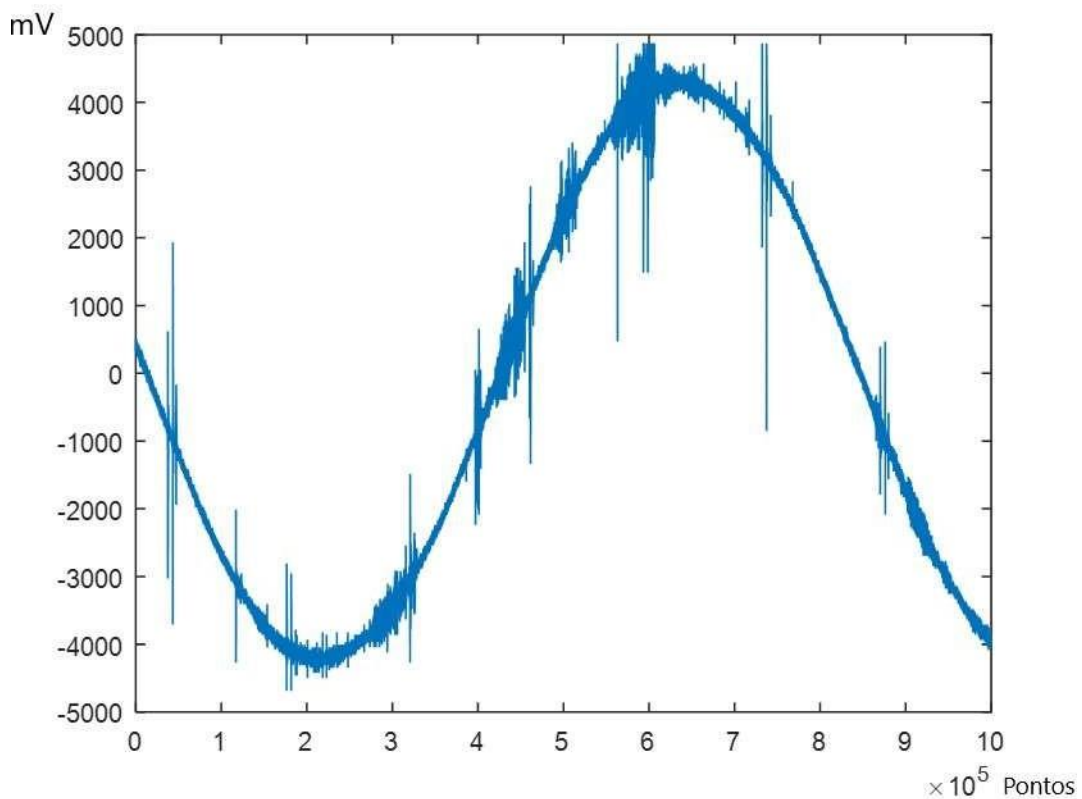
O primeiro pacote de informações a ser tratado foi o conjunto de dados da fase A. Cada uma das 10 coletas possui 100 medições de aproximadamente 20ms cada, gerando 1000 amostras de sinais que serão tratadas e sobrepostas por rotina desenvolvida no Matlab® para explorar a potencialidade de cada um dos mecanismos de filtragem.

Inicialmente o sinal era segregado em componentes de baixa frequência para extração dos sinais da frequência fundamental de modo que os sinais dos pulsos de DP possam se sobrepor a eles nos processos posteriores de filtragem. Essa etapa foi executada mediante a rotina de projeto de filtros passa baixa simples do MATLAB® denominada “*fdesign*”. O valor ajustado da frequência de corte foi de 50 Hz e 100 Hz para a stopband, usando-se filtros FIR.

Por conseguinte, o sinal resultante da baixa frequência era usado apenas para *display* e confronto da posição de fase dos sinais de DP de alta frequência. Esses eram então submetidos aos filtros a serem estudados.

4.2.2.1 *Threshold*

Figura 22 – Sinal de 20 ms bruto sem tratamento.

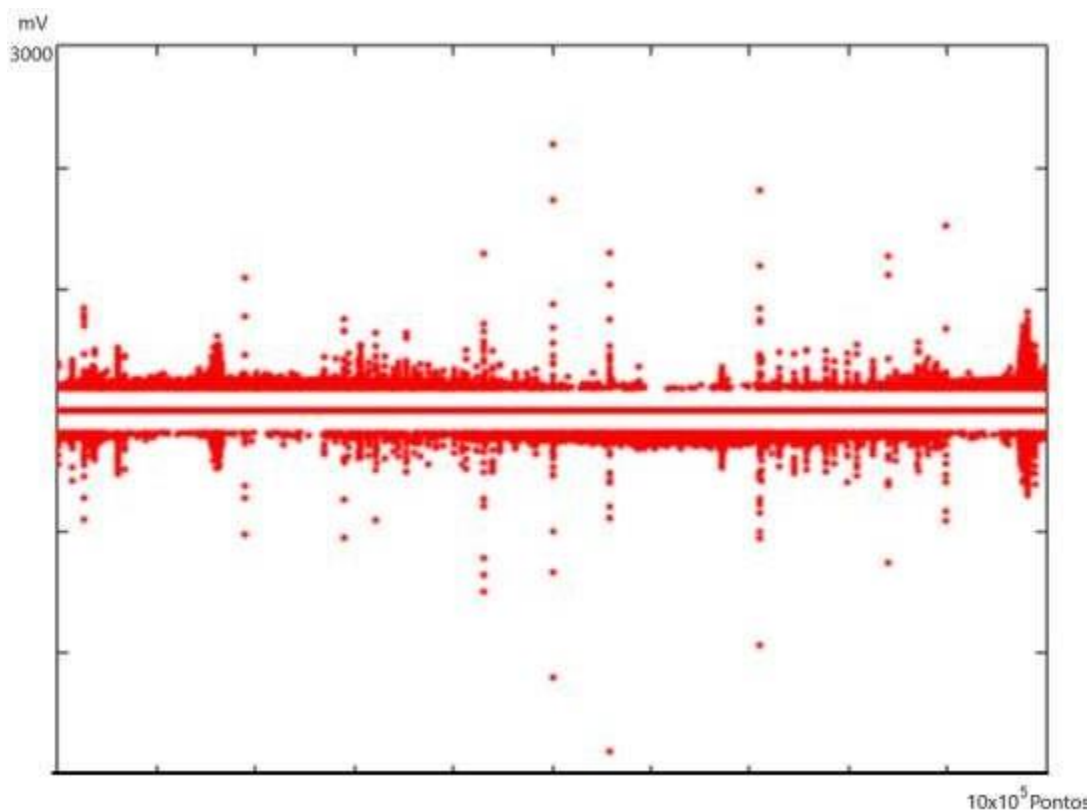


Fonte: Autor

Como pode ser observado na FIGURA 22, os sinais de DP são os pulsos embarcados no sinal da fundamental acima. Entretanto, os pulsos de baixa amplitude e destaque perante a fundamental apresentam, na representação acima, baixa relevância para a análise. No entanto, nessa mesma posição outros pulsos podem surgir em outra fotografia de instante. Após a análise

experimental desses dados, verificou-se que o mecanismo de limiar para o *threshold* que melhor preservava esses sinais trazendo os pulsos de maior amplitude e potencial de representar DPs se dariam pelo triplo da média absoluta dos pontos. É possível perceber a atuação do fator limitante observando-se a FIGURA 23, onde representa-se apenas uma amostra de 20 ms.

Figura 23 - Tratamento de uma amostra de 20 ms



Fonte: Autor

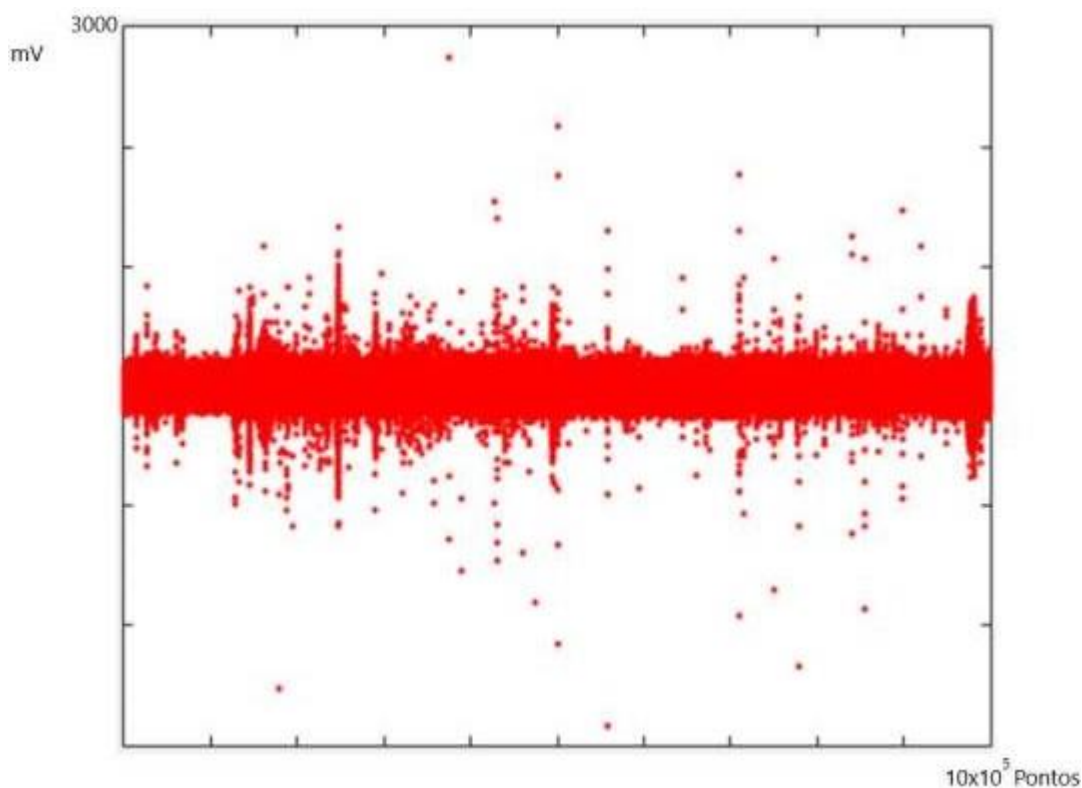
Posta a fórmula, executou-se a rotina com a sobreposição de todas as imagens para obtenção final do sinal de DP.

4.2.2.2 *wavelet*

O primeiro tratamento do sinal de DP com a transformada *wavelet* se deu pela decomposição do sinal. Através da função *wavedec*, segregou-se cada amostra de sinal em 3 camadas, utilizando-se o modelo de Haar, o qual, mediante experimentação, trouxe melhor conservação dos pulsos de descargas parciais quando submetidos ao filtro, dentre as opções da

ferramenta. Nesse sentido, todas as componentes de frequência com valores inferiores a 125, kHz foram eliminadas, preservando-se as demais. Em seguida o sinal era recomposto para início da rotina de sobreposição de imagens. Essa rotina foi então aplicada a todos as 100 amostras de todas as 10 coletas. Na FIGURA 24 podemos constatar uma amostra de 20 ms.

Figura 24 - Sinal filtrado para uma amostra.



Fonte: Autor

4.2.2.3 Filtro IRR

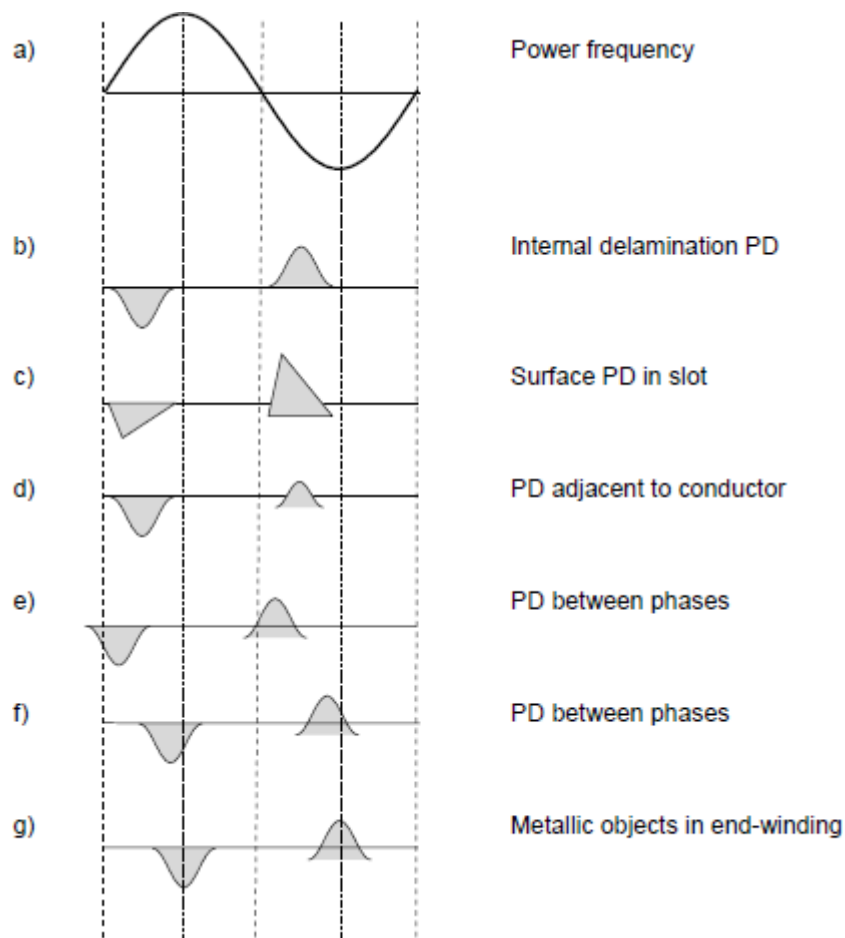
Os filtros de resposta em frequência utilizados na solução que apresentaram melhor desempenho computacional foram os de resposta ao impulso infinito (IIR), por sua característica recursiva e de menor quantidade de pólos para obtenção da função de transferência desejada. Buscando-se as mesmas frequências de corte dos filtros anteriores, o filtro foi obtido mediante a rotina “chebwin” de Chevyshev. Utilizou-se então um filtro de ordem 34 para segregação dos sinais de alta frequência oriundos das DPs com frequência de corte de 125 kHz.

4.3 Análise Comparativa

A identificação de um defeito é um processo de inferência que permite endereçar corretamente um conjunto de sinais de descargas parciais para uma topologia específica de defeito. Essa definição considera como alvo da informação do diagnóstico o defeito ao passo que os sinais de DP são o caminho para consegui-lo (CONTIN, 2015).

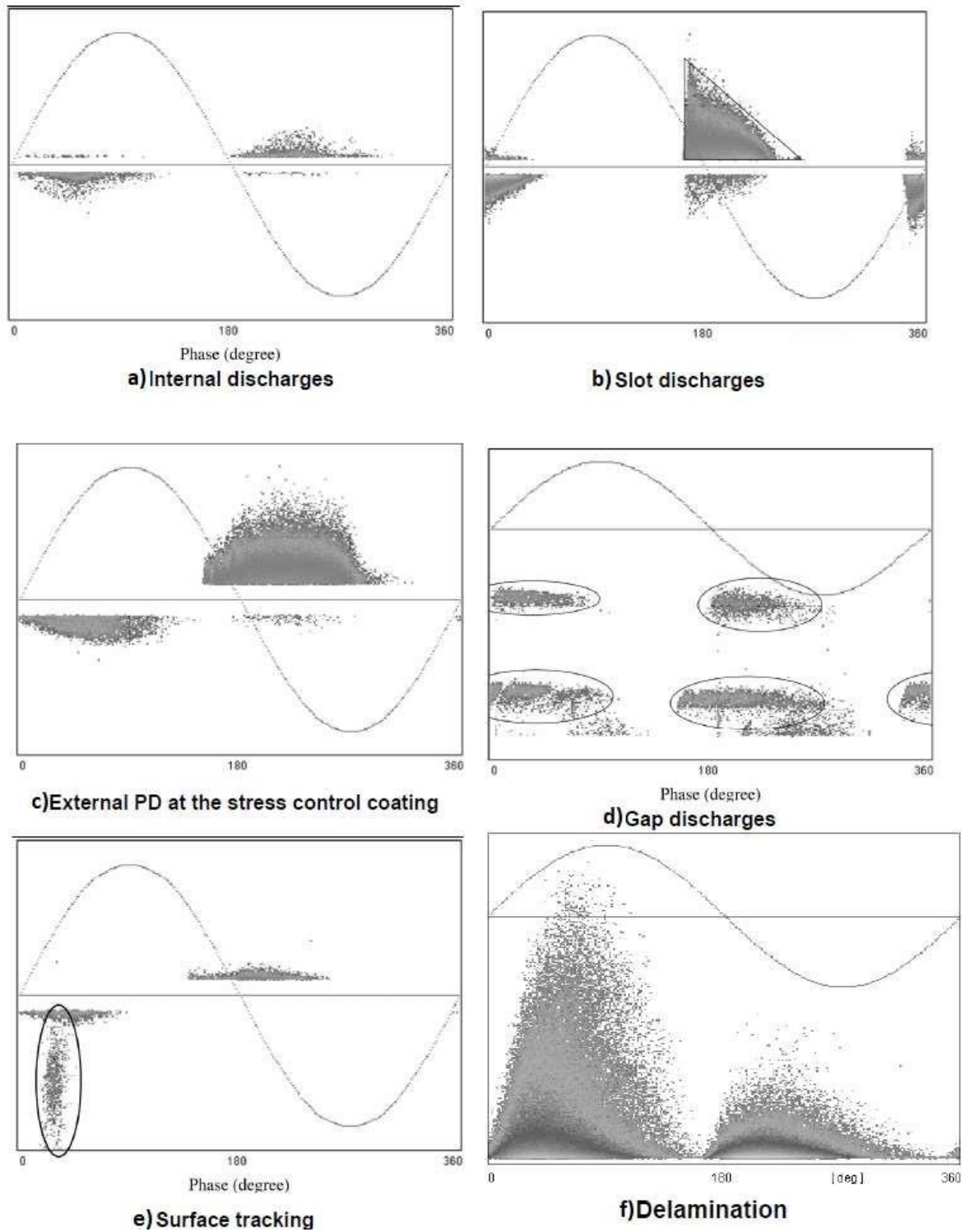
Na sequência, será discutido o diagnóstico de atividade de descargas parciais mediante os padrões dispostos na IEEE 1434 (2014) e IEC 60034-27-2 (2012), conforme as FIGURAS 25 e 26.

Figura 25 - Padrões de DP e localização do defeito - IEC 60034-27-2



Fonte: IEC 600234-27-2 (2012).

Figura 26 - Padrões e localização de defeito. IEEE 1434



Fonte: IEEE 1434 (2014).

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

Os resultados estão organizados entre as fases A e C, para cada um dos patamares de carga, nos três modelos de filtros apresentados. Todos os resultados são dispostos em quantidade de pontos para o sinal de 20 ms no eixo das abscissas e em mV para o eixo das ordenadas.

5.1 Primeiro Patamar de Carga: 4 MVA_r

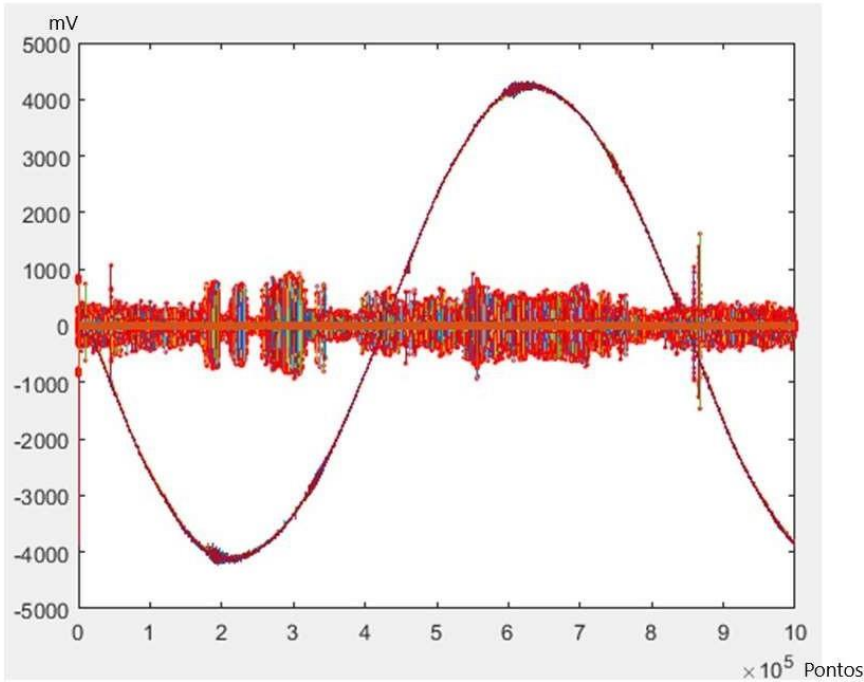
Nesse patamar de carga a atividade de descargas parciais é um pouco menos intensa, uma vez que a circulação de corrente pelos enrolamentos da máquina é menor, o que repercute em menos stress térmico no gerador e, por conseguinte, menor atividade de descargas parciais.

5.1.1 Threshold

Abaixo, nas FIGURAS 27 e 28, encontram-se os resultados da análise mediante threshold das fases A e C.¹

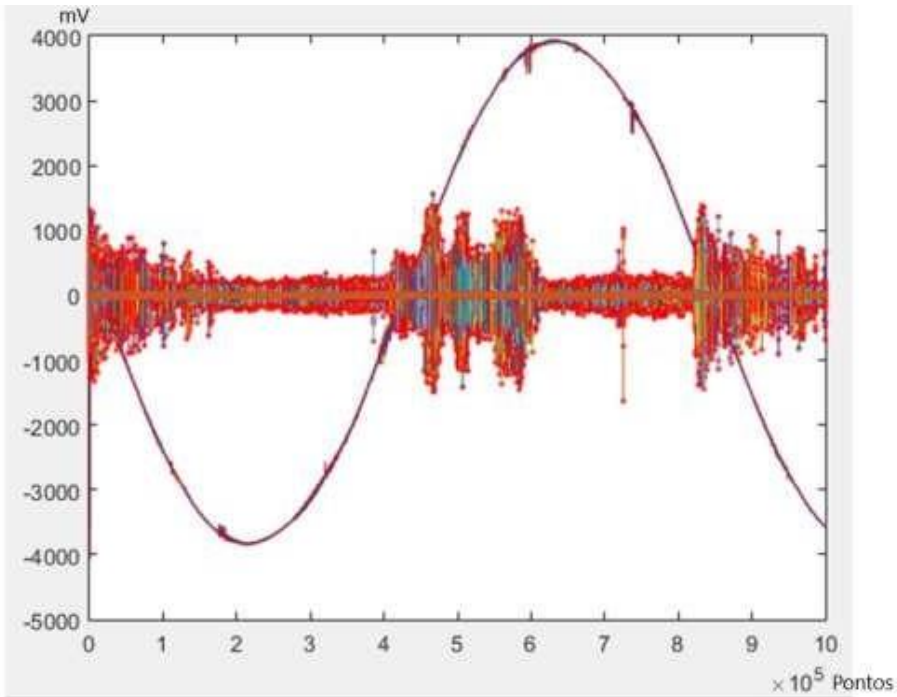
¹ Os primeiros gráficos foram coloridos com níveis de intensidade dos pulsos filtrados ao se exibir na imagem. Porém esse fato gerou grande esforço computacional e não agregava na análise, sendo eliminada das tratativas posteriores.

Figura 27 - Resultado Threshold, Fase A, 4 MVar



Fonte: Autor

Figura 28 - Resultado Threshold, Fase C, 4 MVar.



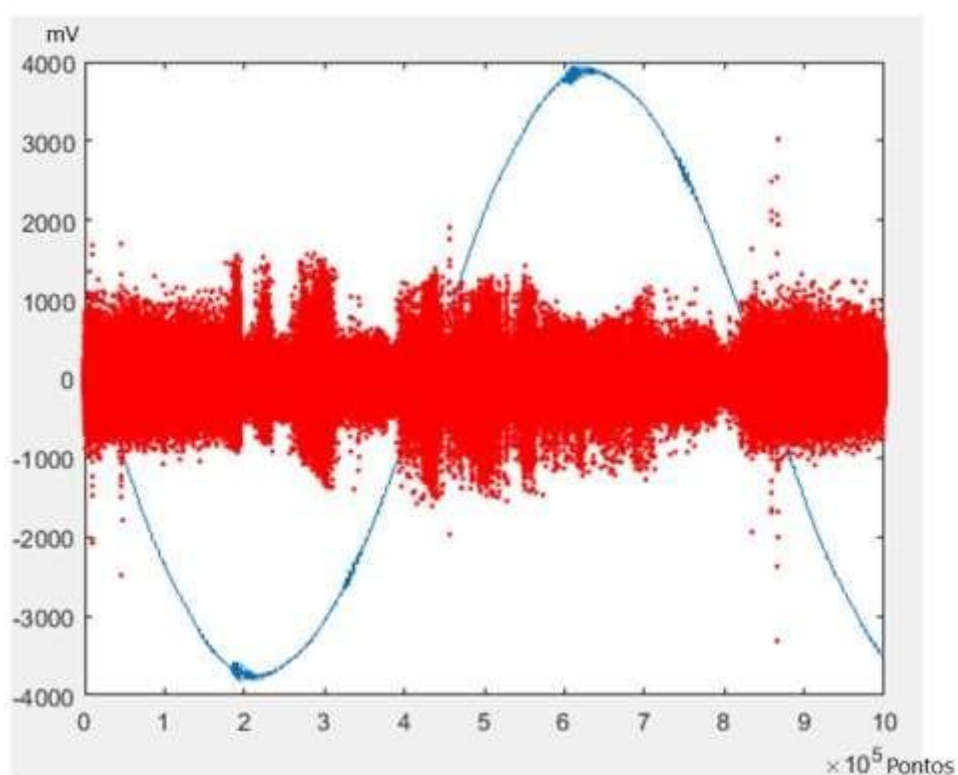
Fonte: Autor

Nesse contexto, verifica-se baixa atividade de DP na fase A, com atividade semelhante ao padrão de descargas internas da FIGURA 26 (item a). Já na fase C há claramente atividade ocorrendo na passagem por zero, no maior instante de dV/dt , com indicação de descargas superficiais em ranhura (item c da fig.25 e item b da fig. 26).

5.1.2 Wavelet

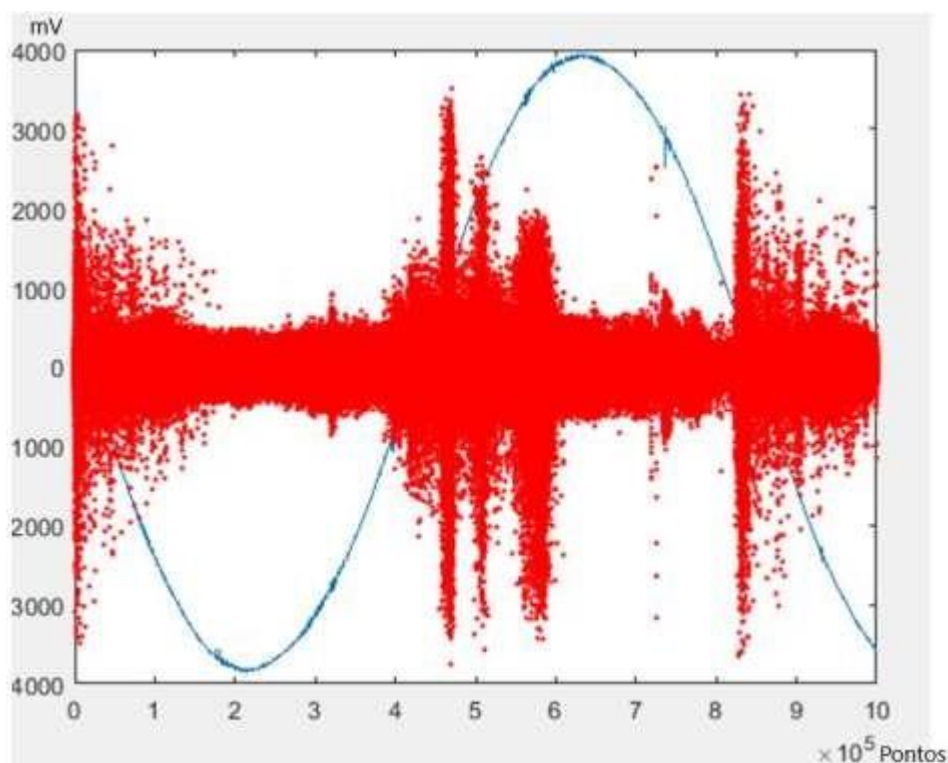
Abaixo, nas FIGURAS 29 e 30, encontram-se os resultados da análise mediante transformada wavelet das fases A e C.

Figura 29 - Resultado Wavelet, Fase A, 4 MVar.



Fonte: Autor.

Figura 30 - Resultado Wavelet, Fase C, 4 MVar.



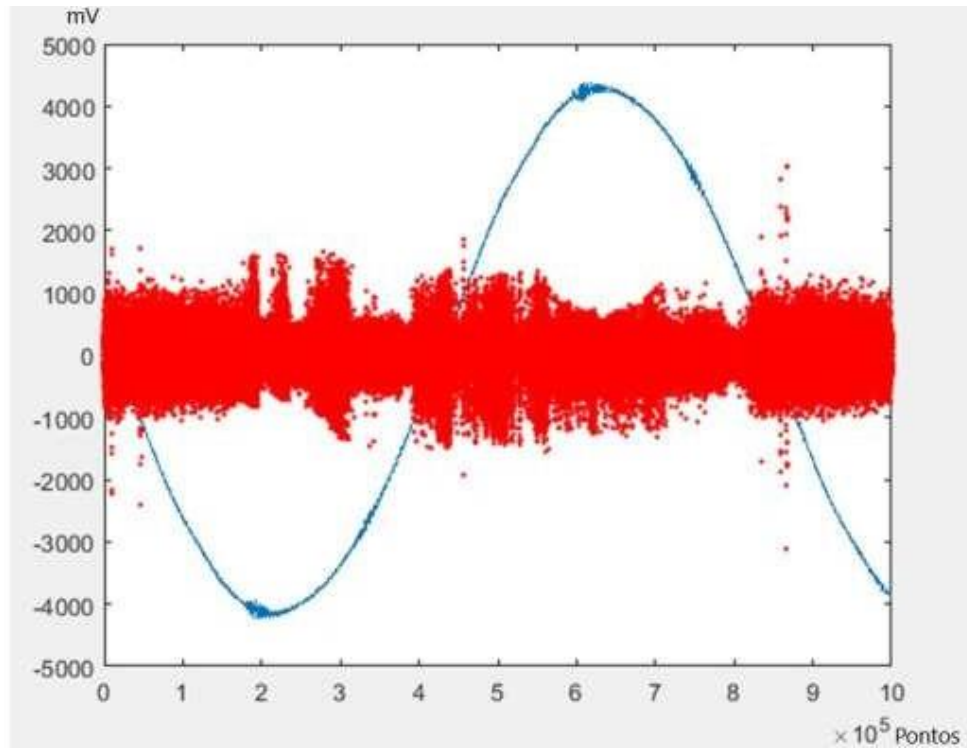
Fonte: Autor.

Nesse contexto, verifica-se comparativamente uma atividade mais baixa de DP na fase A, em relação aos demais filtros, com atividade semelhante ao padrão de descargas internas da FIGURA 26 (item a). Já na fase C há claramente atividade ocorrendo na passagem por zero, no maior instante de dV/dt , com indicação de descargas superficiais em ranhura (item c da fig.25 e item b da fig. 26) e trilhamento superficial (item e da fig. 26), uma vez que existem picos segregados de descargas nesse ponto. Os resultados são similares aos da análise de threshold, porém a amplitude dos sinais é quase 3 vezes maior.

5.1.3 IIR Chebyshev

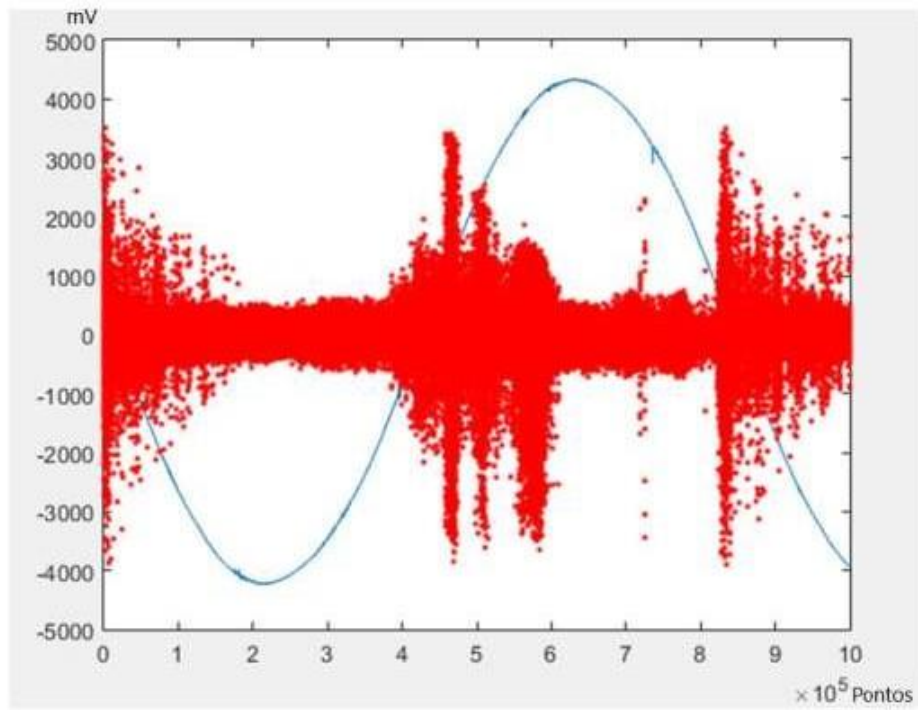
Abaixo, nas FIGURAS 31 e 32, encontram-se os resultados da análise mediante filtro de resposta em frequência Chebyshev das fases A e C.

Figura 31 - Resultado IIR, Fase A, 4 MVar.



Fonte: Autor

Figura 32 - Resultado IIR, Fase C, 4 MVar



Fonte: Autor

A análise de Chebyshev é idêntica às tratativas verificadas na transformada Wavelet com descargas internas na fase A e descargas em ranhuras e trilhamento superficial na fase C.

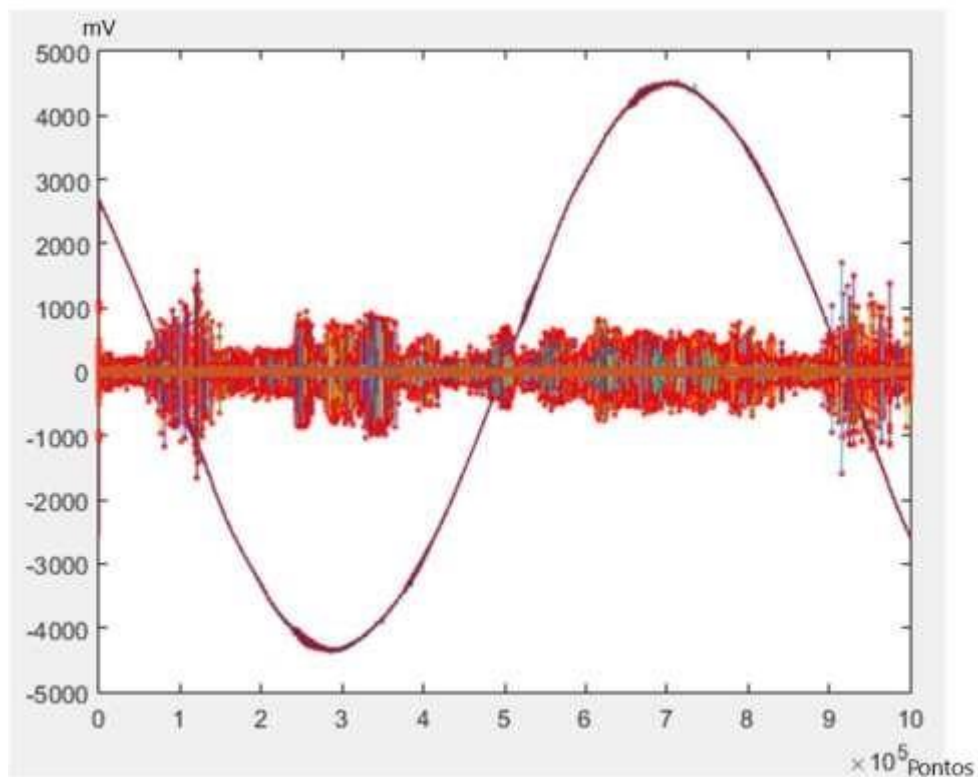
5.2 Segundo Patamar de Carga: 84 MVar

Nesse patamar de carga a atividade de descargas parciais é um pouco mais intensa, uma vez que a circulação de corrente pelos enrolamentos da máquina é superior, o que repercute em mais stress térmico, com mais cargas livres e, por conseguinte, maior atividade de descargas parciais.

5.2.1 Threshold

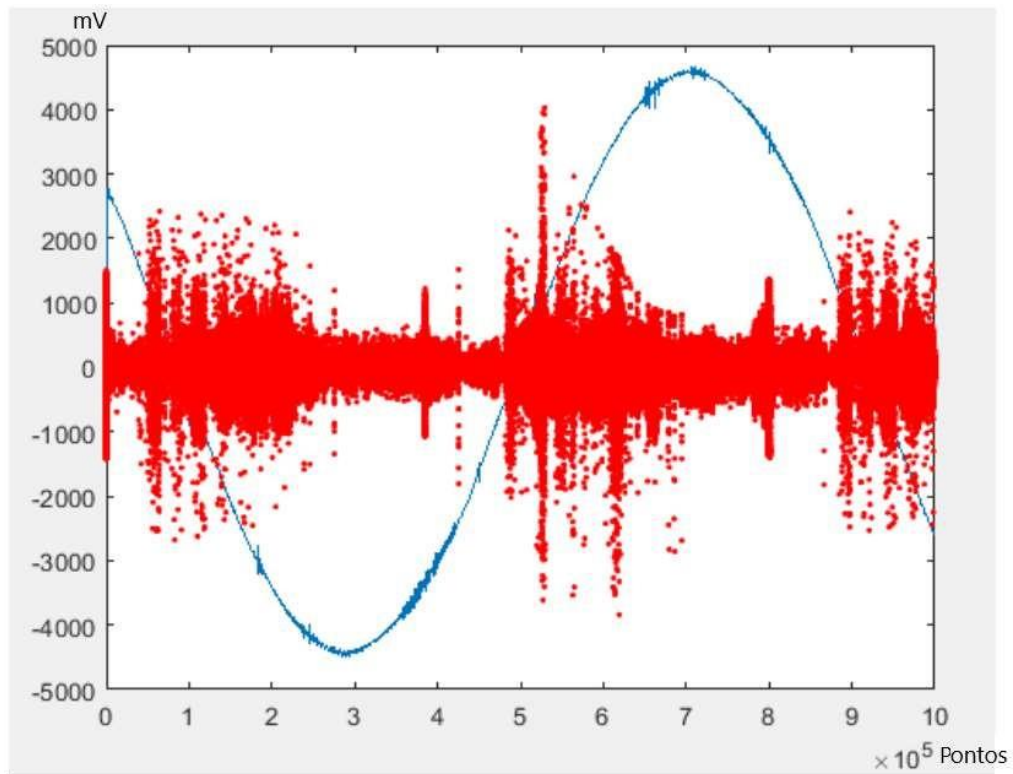
Abaixo, nas FIGURAS 33 e 34, encontram-se os resultados da análise mediante threshold das fases A e C.

Figura 33 - Resultado Threshold, Fase A, 84 MVar



Fonte: Autor.

Figura 34 - Resultado Threshold, Fase C, 84 MVar



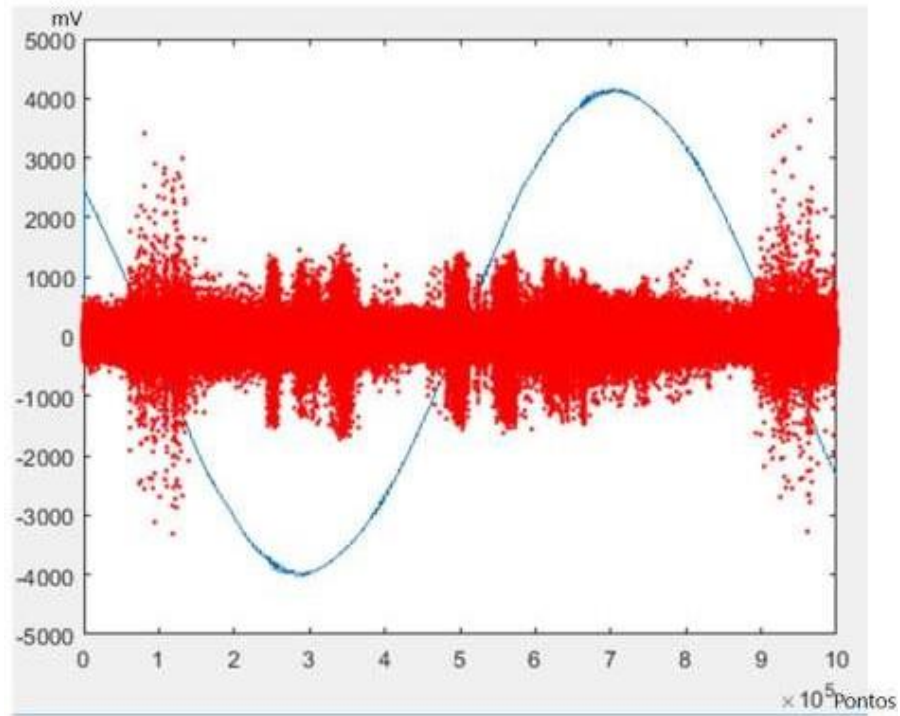
Fonte: Autor

A análise indica diagnóstico similar verificado no patamar de carga anterior, sem grande diferenciação. É perceptível que o nível das descargas é superior, conforme esperado, na fase A, com pequena formação de perfil de descarga em ranhura. Há, também, grande elevação nas descargas tipo ranhura perceptível na fase C, além do incremento de valores generalizados de atividades de DP. Nesse contexto, o threshold aproximou-se dos demais filtros.

5.2.2 Wavelet

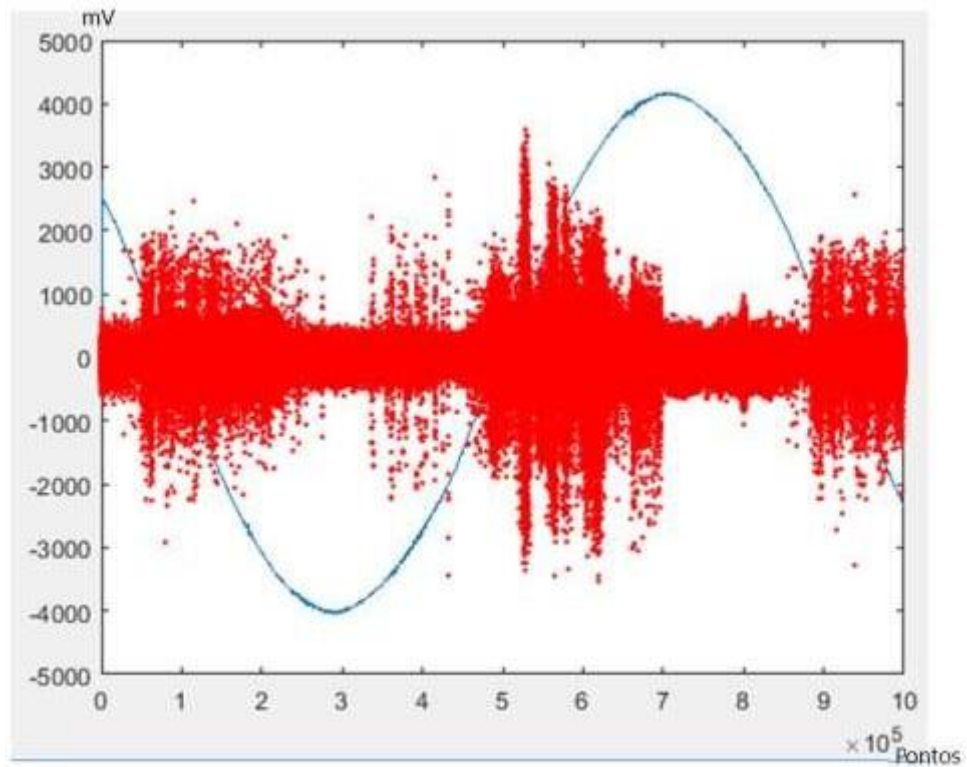
Abaixo, nas FIGURAS 35 e 36, encontram-se os resultados da análise mediante transformada wavelet das fases A e C.

Figura 35 - Resultado wavelet, Fase A, 84 MVar



Fonte: Autor

Figura 36 - Resultado wavelet, Fase C, 84 MVar.



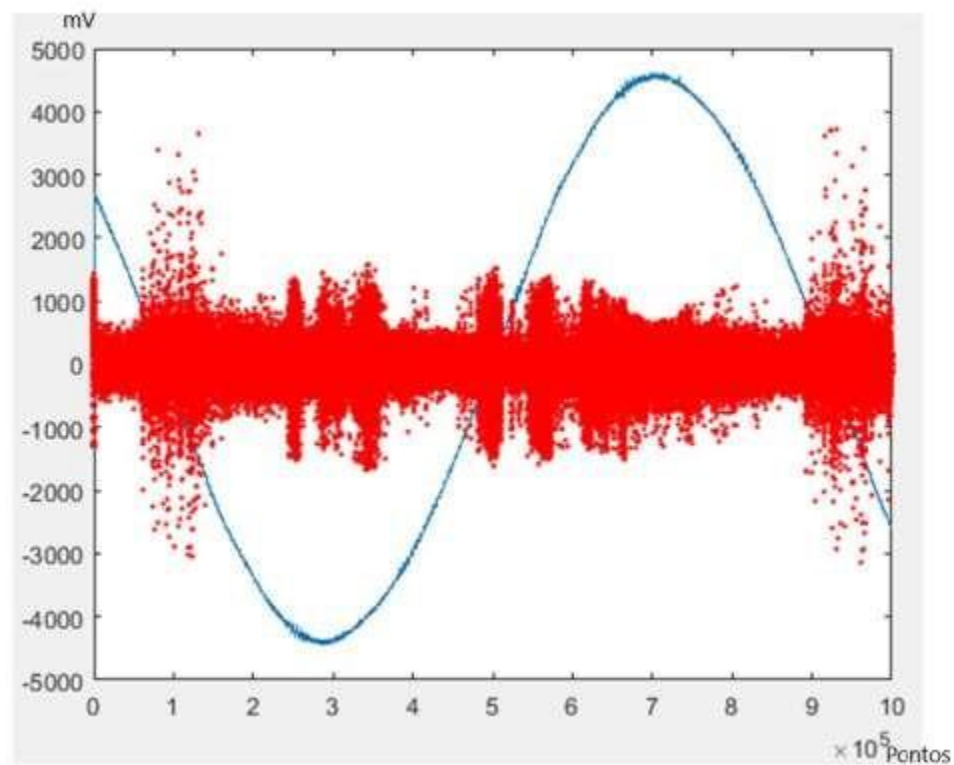
Fonte: Autor.

Nesse contexto, verifica-se um aumento da atividade de DP na fase A, com atividade semelhante ao padrão de trilhamento superficial da FIGURA 26 (item e). Já na fase C há claramente atividade ocorrendo na passagem por zero, no maior instante de dV/dt , com indicação de descargas superficiais em ranhura (item c da fig.25 e item b da fig. 26) e trilhamento superficial (item e da fig. 26), uma vez que existem picos segregados de descargas nesse ponto, semelhante ao diagnóstico do patamar de carga anterior, porém com maior intensidade e melhor definição do mecanismo de defeito.

5.2.3 IIR Chebyshev

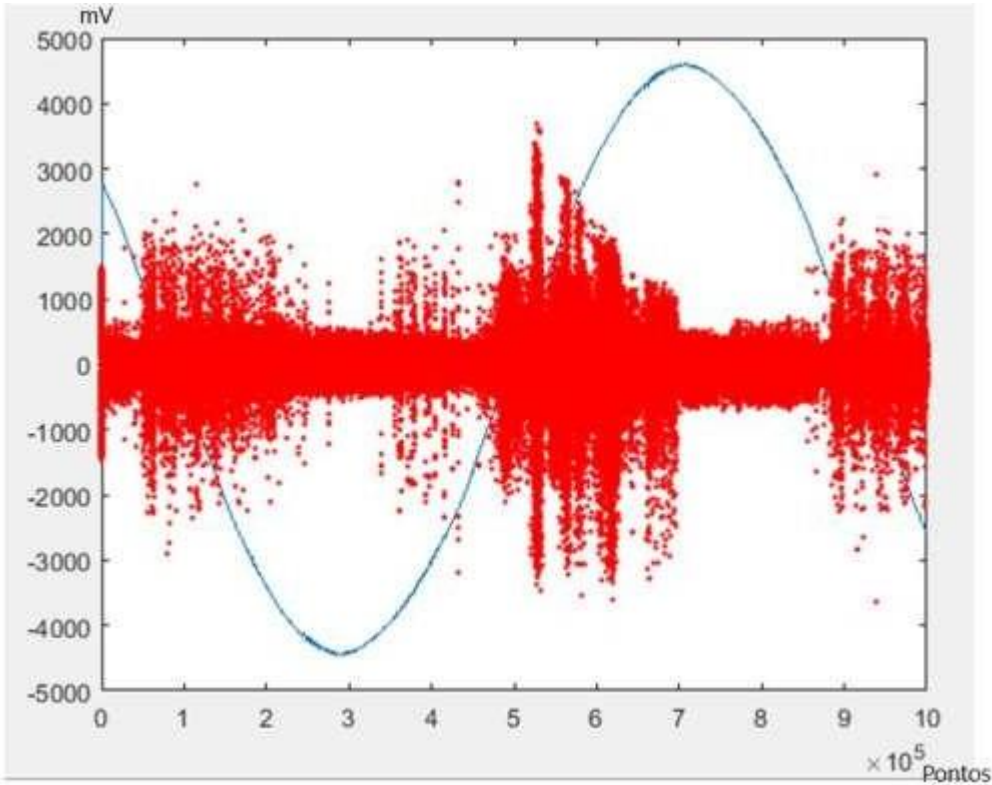
A seguir, nas FIGURAS 37 e 38, encontram-se os resultados da análise mediante transformada Chebyshev das fases A e C.

Figura 37 - Resultado IIR, Fase A, 84 MVar



Fonte: Autor.

Figura 38 - Resultado IIR, Fase C, 84 MVar.



Fonte: Autor

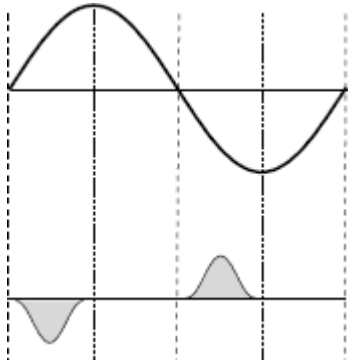
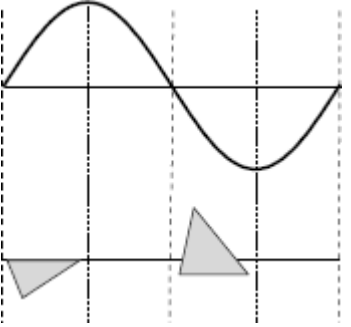
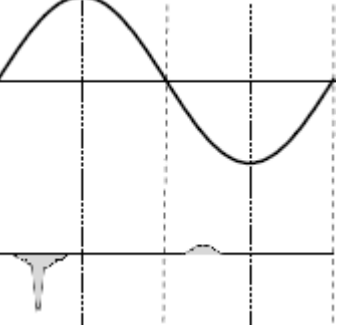
Os diagnósticos apontados nas filtagens IIR são idênticos ao apontado pela avaliação via wavelets, sem grandes diferenças visuais entre os dados resultantes. No entanto, na fase A há mais pontos indicativos de descargas de perfil de trilhamento do que na análise via wavelet com uma formação mais nítida do formato de trapézio do padrão de DP próximo à passagem pelo zero.

CAPÍTULO 6 Análise e Comparação

6.1 Análise

Verificamos no capítulo anterior o resultado dos tratamentos dados às informações colhidas no campo e o diagnóstico mais provável baseado nas sugestões combinadas das IEC 60034-27-2 (2014) e IEEE 1434 (2012). Os diagnósticos que foram possíveis perceber com a extração dos dados são os seguintes:

Tabela 6. Diagnósticos verificados.

Diagnóstico	Descrição do Fenômeno	Forma Gráfica Preponderante
Descargas internas	Descargas parciais ocorridas dentro dos vazios que naturalmente ocorrem no material isolante. Seu grau de atividade possui correlação com o avanço do desgaste normal da isolação com o tempo.	
Descargas em ranhura	São descargas no meio isolante entre uma barra e a ranhura por onde circulam as bobinas do estator em seu núcleo de ferro. Como encontra-se aterrado, são usualmente descargas de energia mais intensa.	
Descargas em trilhamento	São descargas parciais que ocorrem sobre superfícies energizadas e são originadas principalmente por contaminantes especialmente sobre barras ou outras partes vivas.	

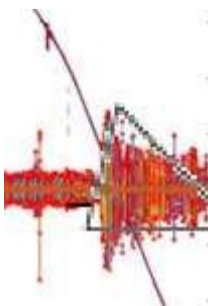
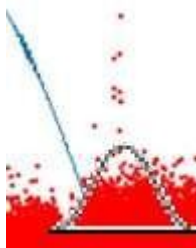
Os padrões verificados são consistentes com a expectativa de vida da máquina e encontravam-se razoavelmente claros em sua forma gráfica. A forma mais eficiente de se garantir uma melhor taxa de acerto no diagnóstico de DP e seu correspondente mecanismo de defeito é através da construção de um banco de dados. Essas informações poderão ser tanto da máquina em questão, com acúmulo de dados periódicos e consistente, como de outros equipamentos onde os mecanismos de falha sejam correspondentes aos padrões de DP para que os mesmos sirvam de guia para análises futuras.

Na mesma oportunidade de coleta, o operador da planta termelétrica havia contratado um diagnóstico especializado em análise de descargas parciais, onde como resultado das medições para as fases A e C verificou-se como resultado predominante as descargas barra-barra e barra-terra. Esse diagnóstico é consistente com as verificações feitas e dados apontados pelo diagnóstico de descargas em ranhuras e trilhamento. Por possuir uma base de dados relevante, alguns fornecedores podem agregar dados adicionais à análise. Verificou-se ainda presença de descargas corona nas cabeças de bobina do gerador, por exemplo.²

Resumidamente, foram apontados os seguintes resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8:

² A disponibilização desse relatório não é possível em razão de propriedade intelectual.

Tabela 7 - Resumo dos resultados do patamar de carga 4MVar.

PATAMAR DE CARGA	FASE	MÉTODO DE FILTRAGEM	Figura e Padrão	DIAGNÓSTICO
4MVar	A	Threshold	27 	Descargas Internas
	C	Threshold	28 	Descargas em ranhuras
	A	Wavelet	29 	Descargas Internas
	C	Wavelet	30 	Descargas em ranhuras e trilhamento

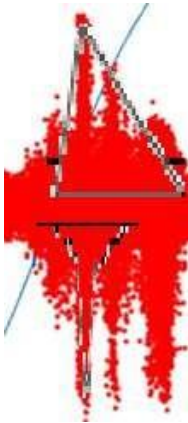
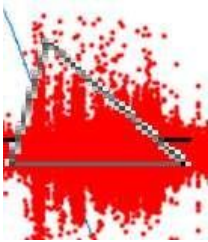
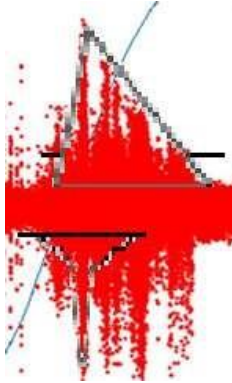
	A	FRF – IIR	31 	Descargas Internas
	C	FRF – IIR	32 	Descargas em ranhuras e trilhamento

Tabela 8. Resumo dos resultados com patamar de carga equivalente a 84MVA_r.

PATAMAR DE CARGA	FASE	MÉTODO DE FILTRAGEM	Figura e Padrão	DIAGNÓSTICO
84MVA _r	A	Thereshold	33 	Descargas Internas e em ranhura
	C	Thereshold	34 	Descargas em ranhuras
	A	Wavelet	35 	Descargas de trilhamento superficial
	C	Wavelet	36 	Descargas em ranhuras e trilhamento superficial

	A	FRF – IIR	37 	Descargas de trilhamento superficial
	C	FRF – IIR	38 	Descargas em ranhuras e trilhamento

Os dados acima apontam que existe uma concentração de atividades de DPs nas ranhuras e também de forma superficial quando aumenta-se o stress térmico à qual a máquina é submetida. É perceptível que existe pouca diferença entre os diagnósticos com wavelet e os filtros de resposta a frequência. No entanto, de forma geral, o filtro de chebyshev apresentou performance superior uma vez que o esforço computacional necessário para o executar foi inferior. Para aplicações de campo onde essa performance pode ser um fator comercial determinante, o desenvolvimento de soluções baseadas nesse mecanismo parece mais promissor.

Para o filtro threshold, verificou-se grande perda de informação, levando a diagnósticos diferentes. Esse tipo de mecanismo acaba sendo bastante usado pelos técnicos de campo pois é de fácil compreensão e num primeiro momento parece mitigar de forma eficaz os diversos ruídos que contaminam a coleta de dados junto ao equipamento. Entretanto, percebe-se que ao introduzir um fator que depende da experiência do técnico, o analista pode perder informações relevantes. Já a técnica de wavelet apresentou bons resultados, porém o esforço computacional foi intenso, com maior tempo de processamento da rotina Matlab. O sistema

acabou portravar durante diversas tentativas de tratamento das informações.

6.2 Comparação

O gerador objeto deste estudo foi então mantido aproximadamente 8 meses após a coleta dos dados que geraram os diagnósticos avaliados no capítulo anterior. Nos meses seguintes à coleta, foi possível constatar ainda que os mancais da máquina apresentavam um pequeno vazamento de óleo lubrificante.

Os mancais são responsáveis pela sustentação do eixo do gerador e o sistema de labirintos interno a esse mancal provê o filme de óleo para que ocorra o suave deslizamento durante a rotação da máquina. Em cada um dos lados da máquina existe um mancal e no rotor encontra-se o munhão que é o ponto de apoio do eixo. Na FIGURA 39 é possível visualizar a parte externa do mancal do lado não acoplado.

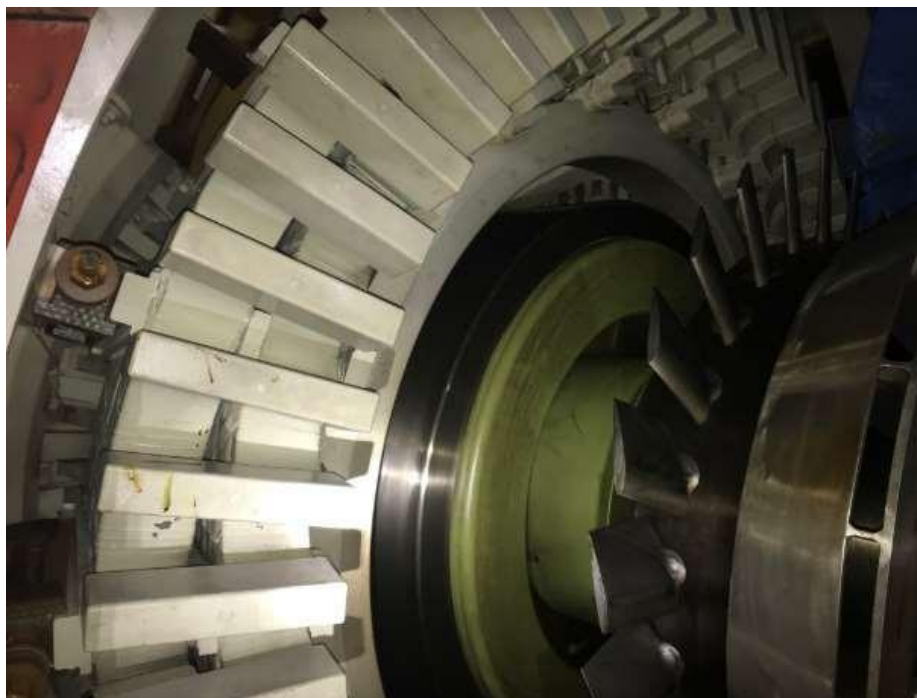
Figura 39 - Da esquerda para direita, excitatriz a escovas de carvão e mancal



Fonte: Autor

Após a abertura da máquina, foi possível perceber que parte desse óleo oriundo do vazamento acabou entrando na máquina. Boa parte do mesmo foi impedido de chegar aos enrolamentos pela tampa defletora (tampa de fibra que fica após a tampa de aço visível na FIGURA 39). No entanto, foi possível constatar que havia pequena presença de óleo nas cabeças de bobina, perceptível na FIGURA 40.

Figura 40 - Cabeças de bobina da máquina com a presença nítida de óleo



Fonte: Autor

Uma vez que a presença de óleo indica a presença de contaminantes, seja nas cabeças de bobina e, muito possivelmente, nas ranhuras, o diagnóstico verificado alguns meses antes de DP é coerente com o achado. Essa presença de contaminantes leva, de fato, a descargas superficiais e nas ranhuras à medida que o óleo penetra.

Comparando-se então o diagnóstico e a situação real, há boas chances de se afirmar que havia, naquela ocasião, a ocorrência de descargas nas ranhuras e descargas superficiais muito possivelmente por conta da contaminação de óleo.

Já o relatório obtido com os dados coletados no mesmo dia da amostragem realizada para este trabalho indicou diagnóstico semelhante. Na fase A foi constatada presença de descargas barra-barra e barra-terra, já na fase C, o mesmo diagnóstico foi apontado e acrescido de apontamento de descargas corona em superfícies externas à máquina, indicando contaminação do sinal bruto por efeito corona em isoladores próximos ao ponto de medição.

As descargas barra-barra são consistentes com o mecanismo de falha de descargas em ranhuras, uma vez que as barras são acomodadas nas ranhuras do entreferro da máquina e as descargas podem ocorrer para a terra ou entre barras.

CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho é analisar o desempenho da ferramenta de diagnóstico utilizando-se de sinais de descargas parciais na avaliação do estado operacional de máquinas elétricas. Para tanto, foi comparado o resultado entregue por três modalidades de filtragem dos sinais usualmente utilizadas por desenvolvedores, correlacionado esse diagnóstico com o estado real de um gerador elétrico de uma planta termoelétrica.

Foram analisados os diferentes mecanismos de ocorrência de DPs em máquinas elétricas, analisaram-se diferentes tipos de filtros de sinais de descargas parciais, aplicando-os em sinais reais. Por fim, foram analisados os resultados obtidos mediante comparabilidade com o estado real de uma máquina.

Atualmente a busca por uma maior confiabilidade e disponibilidade dos sistemas elétricos é um desafio para projetistas e mantenedores. Procura-se cada vez mais a redução do número de falhas a fim de que interrupções na geração, transmissão e distribuição de energia sejam evitadas e conseqüentemente o consumidor final não seja prejudicado no abastecimento de energia elétrica.

A análise de descargas parciais apresenta-se como uma grande aliada da manutenção preditiva em máquinas elétricas pois como pode ser percebido, foi capaz de detectar uma anormalidade de maneira antecipada.

A aplicação de uma técnica efetiva de filtros de ruídos, associadas a uma ferramenta de software de análise adequada, torna possível completar um diagnóstico preciso sobre o *status* do dielétrico, quando medições de DPs in-situ e online são executadas nas instalações de alta tensão. A aquisição de DPs na banda de frequência a partir de 0,1 a 20 MHz mostrou-se extremamente eficaz para a detecção e localização de defeitos na isolação. Entretanto, nessa banda de frequência o ruído de fundo registrado nas medições in-situ e online é usualmente alto. Por essa razão, a utilização de técnicas efetivas de filtragem para sua rejeição, sem perda dos sinais de DP, é necessária (ORTEGO et al., 2020).

Entretanto esses dados precisam ser obtidos e tratados de forma mais objetiva em campo. Verificou-se que o usual mecanismo de *threshold*, apesar de ser de simples uso, pode levar a certa perda de informação relevante para o diagnóstico. É importante salientar que cada máquina e cada sistema de coleta e análise apresenta suas peculiaridades e as particularidades de um achado não podem necessariamente ser replicadas em outros sistemas. No entanto, apresentam-se os filtros de Chebyshev e wavelet como uma alternativa para melhor obtenção desses pulsos de DP uma vez que podem se mostrar como ferramentas que conservam de modo

mais eficaz as informações do campo. Outras oportunidades de continuação de investigação também não podem ser descartadas. Para o próprio mecanismo de threshold podese avaliar combinação de outras formas de obtenção dos sinais de DP, porém sempre será susceptível ao ‘primeiro combate’ do técnico de campo que está obtendo as informações para análise posterior. Definir o melhor coeficiente de supressão das informações que não são relevantes pode também ser vinculado a outras formas como o desvio padrão ou agregar à análise a variação de fase.

Além disso, é possível otimizar as outras aplicações com funções de transferência de menor ordem para reduzir o esforço computacional, a depender do nível de ruído da aplicação que se deseja tratar. Ou mesmo outros módulos de wavelet, em constante desenvolvimento, podem se demonstrar mais apropriados para aplicação em DPs e possuir, portanto, desempenho superior.

Por fim, destaca-se a correlação do diagnóstico verificado com a situação real da máquina. Mesmo com o mecanismo de threshold possuindo um mecanismo simples de supressão de informações menos relevantes, constata-se que o diagnóstico não seria prejudicado no patamar de carga reativa mais elevada, provando o valor da análise de descargas parciais como forma de avaliar a ‘saúde’ de uma máquina elétrica. O resultado poderá ser ainda mais assertivo com o tempo ao se montar um banco de dados com variadas formas de defeito e seu padrão de DPs. Esse tipo de dado, guardado hoje pelas empresas que executam análises de DP, é possivelmente o principal segredo industrial para quem vende esse tipo de solução. Por conter informação tão valiosa, pode ser considerado também aos grandes operadores a manter à disposição esse histórico de padrões de DP sobre sua própria frota de máquinas.

REFERÊNCIAS

ABB. **Power Chart for GT24 Termobahia 60WY23Z-109**. Manual do Fabricante. Disponível em: [Users Manual ACS 502_506.pdf \(abb.com\)](http://Users Manual ACS 502_506.pdf (abb.com)). Acesso em: 12 de junho de 2021.

ALSTOM, P. **Introduction to Generator Block**. Manual de Operação e Manutenção, 2003.

ALSTOM, P. **Technical Data for Generator 60WY23Z-109 with Static Excitation**. HTCM 648 879, 2001.

BUGARELLI, R. **Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CARNEIRO, P. C. **Proposta de metodologia para realce de contraste em imagens de mamas densas utilizando decomposição multiescala com transformada discreta wavelet**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2019.

CONTIN, A. **Diagnostics of Insulation Systems by Means of Partial Discharges**. 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, 2015.

COSTA, E. G.; NEVES, W. **Descargas Parciais**. Apostila Curso Dielétricos, 1996.

EISENHARDT, K. M. **Building Theories From Case Study Research**. The Academy of Management Review, p. 532-550, 1989.

FITZGERALD, A. E. et al. **Máquinas Elétricas**. 7 ed. São Paulo: McGraw Hill, 2008.

G1. **Falha humana provocou apagão nas regiões Norte e Nordeste em março**. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/falha-humana-provocou-apagao-no-norte-e-nordeste-diz-ons.ghtml>. Acesso em: 6 de abril de 2018.

GARCIA, M. S. **Análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos a partir da monitoração de vibrações**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

GUTIERREZ, C. E. **Eliminação do Ruído Por Encolhimento de Wavelets**. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

HAUSCHILD, W.; LEMKE, E. **High-Voltage Test and Measuring Techniques**. Berlim: Springer, 2014.

IEC 60270. **High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements**. International Standard. Genebra, Suíça, 2000.

IEC60034-27-2. **On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines**. Genebra, Suíça, 2012.

IEEE Std 1434. **IEEE Std 1434 - IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Machinery.** 2014.

JAMES, J.; KULKARNI, S.; PAREKH, B. **Partial discharge in High Voltage Equipments-HV Cable.** Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, China, 2009.

KOPF, U.; FASER, K. **Narrow-band Noise and Repetitive Pulses in On-site PD Measurements.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, p. 433- 447, 1995.
MALLAT, S. **A Wavelet Tour of Signal Processing.** Paris: Elsevier, 2009.

MAURO, M. A. **Análise de vida útil de isolamento de geradores com enrolamento de armadura refrigerado a Água.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

MILASCH, M. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante.** Itajubá: Edgard Blücher, 1983.

NAJESH, V.; GURUJAJ, B. I. **Evaluation of Digital Filters for Rejecting Discrete Spectral Interference in On-site PD Measurements.** IEEE Transactions On Electrical Insulation, p. 73-85, 1993.

NALON, J. A. **Introdução ao Processamento Digital de Sinais.** Campinas: LTC, 2009.

O GLOBO. **Apagão provoca prejuízos de R\$ 385 milhões no Nordeste.** 2013. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/apagao-provoca-prejuizos-de-385-milhoes-no-nordeste-9752363>. Acesso em: 12 de março de 2021.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas.** Boston: Pearson, 2010.

ORTEGO, J.; et al. **Processing techniques applied to partial discharge measuring in rotating machines.** 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics, 2020.

SAINI, M. S.; KAUR, K. **Design of IIR Filter Using Chebyshev.** International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology, p. 2703-2709, 2015.

SATISH, L.; NAZNEEN, B. **Wavelet-based Denoising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, p. 354-367, 2003.

STONE, G. C.; STRANGES, M. K.; DUNN, D. G. **A review of recent developments in IEEE and IEC standards for offline and online testing of motor and generator stator windings.** IEEE Industry Applications Magazine, 2016.

STONE, G. **Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 12, 2005.

VIDYA, H.; KRISHNAN, V.; MALLIKARJUNAPPA, K. **A Wavelet Transform Technique for De-noising Partial Discharge Signals.** International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008.

YOUNG, R. K. **Wavelet theory and its applications**. Springer Science & Business Media, 2012.

ZAJĄC, M.; SUŁOWICZ, M.; PETRYNA, J. **Partial Discharges Emission Testing in the Generator Winding Insulation in the Time-Frequency Domain**. 2018 International Symposium on Electrical Machines, 2018.

ZANETTA, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. 1. ed. São Paulo: Edusp, 2003. v. 1, p. 420.