

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

SISTEMA PARA DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
DESCARGAS PARCIAIS EM ESTADORES DE HIDROGERADORES

PAULO ROBERTO MOUTINHO DE VILHENA

TD 16 /2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campos Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

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

PAULO ROBERTO MOUTINHO DE VILHENA

SISTEMA PARA DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
DESCARGAS PARCIAIS EM ESTADORES DE HIDROGERADORES

TD 16 /2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campos Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

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

PAULO ROBERTO MOUTINHO DE VILHENA

SISTEMA PARA DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
DESCARGAS PARCIAIS EM ESTADORES DE HIDROGERADORES

Tese submetida à Banca Examinadora
do Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica da UFPA para
obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Elétrica na área de
sistemas de energia elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campos Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

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

Vilhena, Paulo Roberto Moutinho de, 1981-
Sistema para detecção, localização e monitoramento
de descargas parciais em estatores de hidrogeradores /
Paulo Roberto Moutinho de Vilhena. - 2015.

Orientador: Victor Alexandrovich Dmitriev.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,
2015.

1. Descargas elétricas - medição. 2.
Descargas elétricas - medidas de segurança. 3.
Turbinas hidráulicas - testes. I. Título.

CDD 22. ed. 537.52

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

SISTEMA PARA DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
DESCARGAS PARCIAIS EM ESTADORES DE HIDROGERADORES

AUTOR: PAULO ROBERTO MOUTINHO DE VILHENA

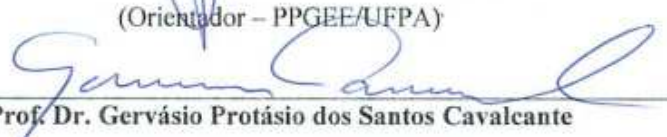
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA
ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.
APROVADA EM: 30/11/2015

BANCA EXAMINADORA:



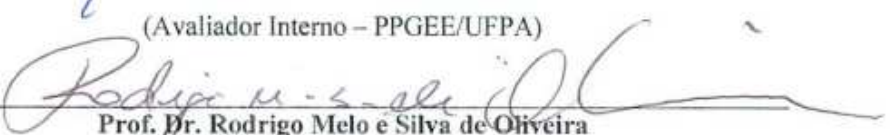
Prof. Dr. Victor Alexandrovich Dmitriev

(Orientador – PPGEE/UFPA)



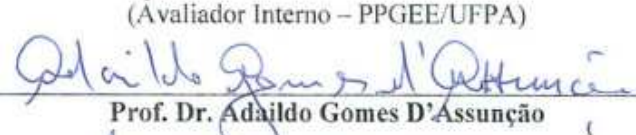
Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



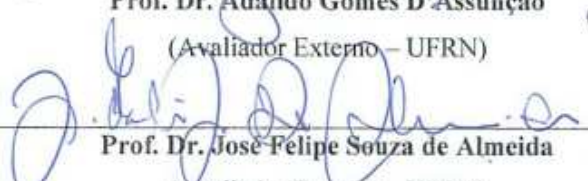
Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



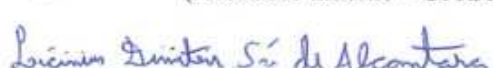
Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção

(Avaliador Externo – UFRN)



Prof. Dr. José Felipe Souza de Almeida

(Avaliador Externo – UFRA)



Prof. Dr. Licinius Dimitri Sá de Alcantara

(Avaliador Externo – UFRA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pêlaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

"Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande.
Se não puder andar, rasteje,
mas continue em frente de
qualquer jeito."

Martin Luther King

DEDICATÓRIA

A minha família, em especial a meus pais (Paulo e Catarina), irmãos (Dienne, Filipe e Tainná), esposa (Ivie), filhos (Gabriel, Ana Paula e Ivie Marina) e afilhadas (Sathiê e Alice) por todo carinho, compreensão, educação e amizade que me foram dados.

Paulo Roberto Moutinho de Vilhena

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por tudo.

Ao Professor Victor Dmitriev que aceitou orientar-me mesmo eu morando em outro estado e em nenhum momento hesitou em transmitir seus conhecimentos.

Ao Professor Rodrigo Oliveira pelo apoio incondicional.

Ao Eng. Jacques Sanz por apresentar-me o tema descargas parciais.

Ao amigo Jorge Brasil que confiou-me a gerência do projeto de P&D “Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento e Diagnóstico On-Line de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores”.

Ao amigo Benedito Rodrigues pelo apoio e incentivo.

Ao amigo Fernando Brasil que sempre esteve ao meu lado nos trabalhos práticos e teóricos.

Aos amigos do laboratório de Nanoeletrônica e Nanofotônica da UFPA.

A todos os amigos da Eletrobrás Eletronorte, que contribuíram direta ou indiretamente para o êxito deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer a minha mãe Catarina Moutinho de Vilhena que nunca deixou eu desistir da Engenharia Elétrica.

Paulo Roberto Moutinho de Vilhena

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Justificativa	1
1.2.	Motivação	2
1.3.	Objetivo do Trabalho	4
1.3.1.	Objetivo Geral.....	4
1.3.2.	Objetivos Específicos	5
1.4.	Revisão Bibliográfica	5
1.4.1.	Sensores para Medição de DP	5
1.4.2.	Processamento de Sinais	6
1.4.3.	Sistemas de Monitoramento.....	8
1.5.	Escopo do Trabalho	11
2.	Descargas Parciais	12
2.1.	Considerações Iniciais	12
2.2.	Teoria de Descargas Parciais	12
2.3.	Definição de Pulsos de DP.....	14
2.3.1.	Carga Aparente q	14
2.3.2.	Taxa de Repetição n.....	14
2.3.3.	Ângulo de Fase ϕ_i e Tempo t_i de Ocorrência de um Pulso DP	15
2.4.	Medições de Descargas Parciais	15
2.5.	Tipos de DP em Máquinas Rotativas.....	15
2.6.	Falhas no Isolamento do Estator	16
2.6.1.	Falhas Em Máquinas Rotativas.....	16
2.6.2.	Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator.....	17
2.7.	Métodos de Medição de DP	18
2.8.	Características do Sistema de Medição de DP.....	21
2.8.1.	Instrumentação Digital.....	21

2.8.2.	Supressão de Ruído.....	24
2.8.3.	Reconhecimento de Padrões	25
2.8.4.	Transformada Wavelet.....	27
2.9.	Considerações Finais	28
3.	Tipos de Sensores Usados para Detecção de DP	30
3.1.	Considerações Iniciais	30
3.2.	Acoplador Capacitivo	30
3.3.	Sensores Ópticos.....	35
3.4.	Sensor Acoplador Direcional de Microfita.....	35
3.5.	Avaliação da Resposta dos Sensores	37
3.5.1.	Aplicação de um Sinal Conhecido de Calibração.....	37
3.5.2.	Ensaio com Alta Tensão.....	39
3.5.3.	Ensaio com Alta Tensão - Simulação de Defeitos em Laboratório	43
3.6.	Considerações Finais	44
4.	Métodos teóricos para Análise de Propagação de dp no Estator	45
4.1.	Considerações iniciais.....	45
4.1.1.	Modelagem da Barra.....	45
4.1.2.	Validação do <i>Software SAGS</i> para Análise de Propagação de Descargas Parciais em Barras Estatóricas.	47
4.1.3.	Montagem do Experimento	49
4.1.4.	Detalhes da Modelagem e Resultados das Simulações.....	56
4.2.	Múltiplas descargas na Isolação de uma Bobina do Hidrogerador.....	57
4.3.	Considerações Finais	59
5.	Processamento Digital de Sinais.....	61
5.1.	Considerações Iniciais	61
5.2.	Estratégia de Identificação de Pico de Descarga Parcial	61
5.3.	Faixa de não Ocorrência de DP	62

5.4.	Resultados e Discussão da Estratégia	63
5.5.	Estimador de Fase da Onda Senoidal.....	64
5.6.	Implementação em LabView do Simulador de Descargas Parciais.....	66
5.7.	Considerações Finais	67
6.	Sistema de medição de Descargas Parciais.....	68
6.1.	Considerações Iniciais	68
6.2.	Circuito de Medição.....	68
6.3.	Instrumentação Proposta.....	68
6.4.	Descrição do Sistema.....	70
6.5.	Considerações Finais	74
7.	Medições de Descargas Parciais no Campo.....	75
7.1.	Considerações Iniciais	75
7.2.	Sistema de Monitoração utilizados na manutenção preditiva.....	75
7.2.1.	Sistema de Monitoração de Descargas Parciais (IMA-DP).....	75
7.2.2.	Sistema de Monitoramento de Máquinas Elétricas – SIMME.....	76
7.3.	Campanha de Medição.....	76
7.3.1.	Inspeção nos Enrolamentos do Estator	77
7.3.2.	Intervenção nos Enrolamentos do Estator.....	78
7.3.3.	Níveis de Descargas Parciais após a Intervenção	79
7.4.	Correlação das Medições de DP e Vibrações Mecânicas.	79
7.5.	Considerações Finais	83
8.	Conclusões e Trabalhos Futuros	84
	Trabalhos Publicados.....	86
	APÊNDICE A - Análise Numérica do Acoplador Direcional de Microfita.....	89
	Referências Bibliográficas.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – (a) Espaçamento insuficiente entre bobinas na área de entrelaçamento das bobinas [1], (b) Descargas de ranhura [80].	2
Figura 1.2 – (a) Avaria no estator, (b) parafuso no estator da máquina e (c) parafuso [Arquivo Técnico Eletronorte, 2007].	3
Figura 1.3 – (a) Bobinas (Ranhuras 173, 174, 175, 177 e 187) as quais tiveram a tinta anti-corona removida, (b) núcleo danificado e (c) parafuso alojado na guia de ar [Arquivo Técnico Eletronorte, 2009].	4
Figura 1.4 – (a) Esquema simplificado do sistema de monitoramento de DP.	4
Figura 1.5 – (a) Esquema simplificado do SSC, (b) SSC [45].	6
Figura 1.6 – Esquema do arranjo de medição [51].	9
Figura 2.1 – Padrão típico de DP em hidrogeradores [14].	13
Figura 2.2 – Secção transversal de uma barra de máquina [14].	16
Figura 2.3 – Causas raízes de falhas em hidrogeradores.	17
Figura 2.4 – Causas de falhas no sistema de isolamento elétrica.	17
Figura 2.5 – Tipos de fabricantes de acopladores capacitivos instalados na mesma máquina.	19
Figura 2.6 – Gráfico típico de DP [1].	20
Figura 2.7 – Típico pulso de descargas parciais [108].	21
Figura 2.8 – (a) Medição do sinal de magnitude dos pulsos PD, (b) Osciloscópio digital.	22
Figura 2.9 – (a) PMA - Análise da magnitude do pulso, (b) PPA - Análise da fase do pulso [4].	23
Figura 2.10 – Separação do ruído no domínio do tempo através do tempo de chegada do pulso [2].	25
Figura 2.11 – Phase resolved PD [2].	26
Figura 3.1 – Sinal aplicado de calibração [Arquivo Técnico Eletronorte, 2009].	30
Figura 3.2 – Esquema geral de instalação para máquinas rotativas [44].	32
Figura 3.3 – Impedância de acoplamento.	32
Figura 3.4 – (a) Instalação do acoplador na UHCN, CNUGH-03, no barramento de saída do gerador (b) vista superior do estator, barramento de saída e acopladores capacitivos.	33
Figura 3.5 – Desenho do acoplador capacitivo [44].	34
Figura 3.6 – Conexão com o terra [44].	34
Figura 3.7 – Acoplador capacitivo [7].	35
Figura 3.8 – Encapsulamento do sensor (a) visto pela frente (antena) e (b) por cima mostrando as conexões ópticas [37].	35

Figura 3.9 – (a) Sensor encapsulado em silicone, (b) Sensor sem encapsulamento.....	36
Figura 3.10 – Esquema elétrico do sensor acoplador direcional de microfita.....	36
Figura 3.11 – (a) Acopladores utilizados no estudo; (b) Utilização do acoplador de 500 pF..	37
Figura 3.12 – (a) Sensor utilizado; (b) Sensor instalado na barra.	38
Figura 3.13 – (a) Cabo coaxial utilizado no estudo; (b) Utilização do cabo coaxial como antena.....	38
Figura 3.14 – Comparação entre os diferentes sensores durante os ensaios de calibração. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima dos sinais pela frequência.....	39
Figura 3.15 – Procedimento de ensaio utilizado durante as medições de DP [48].....	39
Figura 3.16 – Padrão de DP, medido a 15 kV pelo acoplador de 80 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.	41
Figura 3.17 – Padrão de DP, medido a 15 kV pelo acoplador de 220 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.	41
Figura 3.18 – Sensor instalado na barra para os ensaios com alta tensão. (a) Instalada na ranhura; (b) Instalada na extremidade da barra, região com maior intensidade campo elétrico.	42
Figura 3.19 – Padrão de DP, medido a 15 kV pelo sensor. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.....	42
Figura 3.20 – Comparação entre os diferentes sistemas de medição durante os ensaios com alta tensão. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima dos sinais pela frequência.	43
Figura 3.21 – (a) Simulação em laboratório de descargas de superfície, (b) Padrão PRPD de descargas de superfície medido em laboratório.....	44
Figura 3.22 – (a) Bobina durante o ensaio de envelhecimento acelerado, (b) Padrão PRPD de descargas tipo <i>gap</i> medido em laboratório.	44
Figura 4.1 – (a)Vista 3D do enrolamento do estator da máquina, (b) vista 3D de parte do estator e (c) detalhes de parte do estator.....	45
Figura 4.2 – Vista 3D de uma das fases da barra (modelo geométrico 3D ainda em SOLIDWORKS).....	46
Figura 4.3 – Vista superior de uma das fases da barra (SOLIDWORKS).	46
Figura 4.4 – Barra renderizada no <i>software Blender</i>	46
Figura 4.5 – Composição interna do modelo da barra concebido no <i>software SAGS</i>	47
Figura 4.6 – Esquemático do experimento realizado em [83].....	47
Figura 4.7 – Tensões transitórias V1 e V2, medidas em [83].	48

Figura 4.8 – Representação do modelo FDTD da barra mostrado no SAGS: dimensões e representação 3D de vários meios.	48
Figura 4.9 – Comparação entre formas de ondas numérica (deste trabalho) e experimental [83] para a tensão V_2	49
Figura 4.10 – Barra, ranhura e acesso ao local de aterramento do experimento.	50
Figura 4.11 – (a) Gerador de função; (b) Osciloscópio; (c) Década resistiva.	50
Figura 4.12 – Conexão do gerador de pulsos e da década resistiva à barra.	51
Figura 4.13 – Barra, ranhura e o local de aterramento do experimento.	51
Figura 4.14 – setup do ensaio realizado na Eletronorte – Miramar.....	52
Figura 4.15 – Sinal gerado pelo gerador de funções.	52
Figura 4.16 – Tensão V_1 medida no osciloscópio	53
Figura 4.17 – Tensão V_2 medida no osciloscópio	53
Figura 4.18 – Representação do modelo numérico da barra utilizada nos experimentos: a) Visão geral do modelo numérico da barra, b) Detalhe do ponto de injeção e resistor de $1\ \Omega$, c) Detalhe do resistor de $8,5\Omega$	54
Figura 4.19 – Forma de onda do sinal injetado na barra na simulação.	55
Figura 4.20 – Forma de onda de V_1 medido na simulação.	55
Figura 4.21 – Forma de onda de V_2 medido na simulação.	56
Figura 4.22 – (a) Forma de onda normalizada da fonte de excitação utilizada para modelar descargas parciais, (b) Espectro da fonte de excitação.....	57
Figura 4.23 – (a) corte de uma barra e a relação da variável L com as regiões da estrutura; (b) variável L em um sistema unidimensional de coordenadas.....	57
Figura 4.24 – (a) Localização do sensor (antena) e localização das descargas simultâneas para as simulações 5 e 161; (b) Visualização da propagação do campo elétrico para $t = 0,0191\ \mu s$ (plano x-y que intercepta o baricentro da barra).....	58
Figura 4.25 – Estatística de localização de descargas para uma única bobina.....	59
Figura 5.1 – Sinal contendo as DP a serem analisadas.....	62
Figura 5.2 – Faixa de não ocorrência de DP.....	63
Figura 5.3 – Valores de início, fim e pico de DP.	64
Figura 5.4 – Gráfico entre Fase Real e Fase Estimada.....	65
Figura 5.5 – Gráfico entre Fase Real e Fase Estimada (detalhe).....	65
Figura 5.6 – Interface do ambiente em LabView.	66
Figura 5.7 – Somatório de todos os sinais.....	67
Figura 5.8 – Valores de início, fim e pico de DP, implementados no labview.	67

Figura 6.1 – Circuito de medição de DP. À esquerda, temos um circuito de uma das fases, onde se conecta um capacitor de acoplamento. À direita, temos a impedância de medição....	68
Figura 6.2 – Diagrama esquemático das ligações físicas das unidades geradores de Coaracy Nunes.....	69
Figura 6.3 – Esquema do Processamento de Sinais de DP.....	70
Figura 6.4 – Sinal de DP e sinal de 60Hz.....	71
Figura 6.5 – Detecção de picos de DP.....	71
Figura 6.6 – Picos de DP detectados e 60Hz.....	72
Figura 6.7 – Amplitude DP x fase.	72
Figura 6.8 – Número de Ocorrência x Amplitude DP (PMA).....	73
Figura 6.9 – Mapa estatístico.....	73
Figura 6.10 – Comparação das medições do Sim_DP (a) e IMA_DP (b).....	74
Figura 7.1 – Diagrama do sistema de monitoração de descargas parciais.	75
Figura 7.2 – Diagrama o sistema de monitoração do SIMME.	76
Figura 7.3 – Mapa estatístico de descargas parciais registrado na CNUGH-03.....	77
Figura 7.4 – Barra de fundo da ranhura 134 apresenta sinal de aquecimento da pintura de acabamento da superfície provocado possivelmente por efeito corona	77
Figura 7.5 – Barras da ranhura 214 apresentam vazamento de resina da impregnação possivelmente por deficiência no processo de cura e a barra de fundo apresenta sinal de deterioração da superfície possivelmente por efeito corona ou descargas parciais.....	78
Figura 7.6 – Intervenção nos enrolamentos do estator.	78
Figura 7.7 – Mapa estatístico após a intervenção nos enrolamentos do estator.	79
Figura 7.8 – Curva de tendência das Descargas Parciais CNUGH-02.....	81
Figura 7.9 – Potência Nominal Gerada x Curva de Tendência das DP.....	81
Figura 7.10 – Vibração no Mancal Guia da Turbina x Curva de Tendência das DP	82
Figura 7.11 – Temperatura do Estator x Curva de Tendência das DP	82
Figura A.1 – Acoplador utilizado para captar descargas parciais na bobina: a) vista frontal (fita), b) vista traseira (plano de terra).....	89
Figura A.2 – Perda de retorno do Acoplador.....	90
Figura A.3 – Modelo FDTD do acoplador direcional como visto no SAGS: (a) vista de cima, (b) vista inferior e (c) de visão lateral.....	91
Figura A.4 – Perdas de retorno (S11) simulada (FDTD) e medida do acoplador direcional de microfita.	92

Figura A.5 – Modelo SAGS FDTD do acoplador direcional na barra modelado para validação de medições: inserção 1: o acoplador direcional; inserção 2: porta de excitação e aterramento; inserção 3: porta de excitação (vista frontal); inserção 4: porta de saída [83].	93
Figura A.6 – Sinal induzido no acoplador direcional, obtido numericamente através da modelagem da barra com o sensor	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator [80].	18
Tabela 2.2 – Padrões típicos de descargas parciais [2].....	27
Tabela 3.1 – Característica da resistividade superficial de isolamento do acoplador direcional de microfita.....	36
Tabela 3.2 – Características das medições de descargas parciais.....	43
Tabela 7.1 – Valores Máximos de pico das PDs [95]	80

LISTA DE SIGLAS

DP – Descarga Parcial

DP – Descargas Parciais

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

SSC – Stator Slot Coupler

RF – Radio Frequência

PRPD – Phase Resolved Partial Discharge

PMA – Pulse Magnitude Analysis

PPA – Pulse Phase Analysis

Sim_DP – Sistema de Monitoramento de Descargas Parciais

PXI – PCI eXtensions for Instrumentation

PCI – Peripheral Component Interconnect

RESUMO

Paradas de máquinas não planejadas causadas por falhas na isolação elétrica de equipamentos do sistema elétrico de potência são um grande problema, pois contabilizam elevadas perdas para planta e comprometem os indicadores de desempenho devido extenso período de parada da unidade geradora necessário para restauração da função geração. A fim de solucionar esse problema, vários pesquisadores e estudiosos da área de grandes máquinas rotativas descobriram que estas falhas estavam frequentemente relacionadas com o aumento do nível de descargas parciais da isolação elétrica da máquina. As ocorrências das DP nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão são sintomas de fragilidade na sua suportabilidade dielétrica, cuja evolução pode ocasionar graves consequências para o equipamento.

Em virtude dessas consequências, a avaliação do estado operativo do enrolamento estatórico, por meio do sistema de medição de DP *on line* proposto nesta tese apresenta estratégias para aumentar a confiabilidade das medições. Como sensor de DP, foi sugerido usar acoplador direcional eletromagnético de microfita capaz de detectar o sinal com maior largura de banda na faixa UHF, comparado com os sensores tradicionais existentes.

O desenvolvimento e a implementação do simulador virtual de DP decorreu da necessidade de se ter exemplos de sinais que permitissem testar algumas técnicas de processamento de sinais DP. O principal resultado da tese é o sistema de medição de DP (denominado SIM_DP) que inclui sensor, sistema de aquisição de dados, software de processamento de sinais de DP e de análise dos resultados. Ao estudar a propagação do sinal em uma barra estatórica foi possível desenvolver uma nova metodologia baseada em análise espectral para localização de DP.

Por meio da estrutura montada em laboratório, foi possível validar o sistema SIM_DP o que favoreceu a análise crítica do fenômeno DP. Por fim foram analisados dados reais de medições de DP em campo e correlação das DP com vibrações mecânicas. Os resultados do trabalho contribuíram para um diagnóstico mais preciso do fenômeno.

Os resultados da tese têm sido aprimorados em laboratório e em campo produzindo novos: implementação de novos ensaios em laboratório como envelhecimento acelerado de barras, novos sensores não invasivos como antenas capazes de medir descargas parciais e novas técnicas empregadas na análise e diagnóstico dos fenômenos relacionados com DP que serão apresentadas em trabalhos futuros.

PALAVRAS-CHAVES: descargas parciais, hidrogeradores, enrolamentos do estator, acoplador direcional de microfita, sistema de diagnóstico.

ABSTRACT

Stops machines unplanned caused by faults in the electrical insulation of the power electric system equipment is a big problem, because account for high losses to plan and undertake performance indicators due long stop period generating unit necessary for the generation function restoration. In order to solve this problem, many researchers and scholars in the field of large rotating machines found that these failures were often related to the increased level of partial discharges (PDs) of electrical insulation of the machine. Occurrences of PDs in insulating systems of high voltage equipment are symptoms of weakness in their dielectric withstand, whose evolution can cause serious consequences for the equipment.

Because of these consequences, the evaluation of the operating status of the stator winding through the on line PDs measurement system proposed in this thesis presents strategies to increase the reliability of the measurements. As PDs sensor, it has been suggested to use electromagnetic microstrip directional coupler can detect the signal with the highest bandwidth in the UHF band, compared to existing traditional sensors.

The development and implementation of virtual simulator PDs caused by the need of having Examples of signals that allow testing some PDs signal processing techniques. The main result of this thesis is the DP measurement system (called SIM_DP) including sensor, data acquisition system, PDs signal processing software and analysis of results. By studying the propagation of the signal in a stator bar was possible to develop a new methodology based on spectral analysis for PDs location.

Through the structure created in the laboratory, it was possible to validate the SIM_DP system which favored the review of the PDs phenomenon. Finally actual data were analyzed for DP measurements in the field and correlation of PDs with mechanical vibration. The results of the work contributed to a more accurate diagnosis of the phenomenon.

The results of the thesis have been improved in laboratory and field producing new: implementation of new laboratory tests as Voltage Endurance Test (VET), new non-invasive sensors such as antennas capable of measuring partial discharges and new techniques used in the analysis and diagnosis of related DP phenomena which will be presented in future work.

KEYWORDS: partial discharges, hydrogenerators, stator windings, directional coupler microstrip, diagnostic system.

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

Ao longo dos anos o monitoramento de descargas parciais (DP), tornou-se o método mais amplamente utilizado para determinar a condição do isolamento elétrico nos enrolamentos do estator de motores e geradores [1]. Comparado com outros testes dielétricos, como fator de dissipação ou resistência de isolação, as medições de DP permitem localizar pontos fracos na isolação e identificá-los [2].

Nos últimos 20 anos, o foco principal da pesquisa foi para expandir a tecnologia DP, para ser aplicada a testes de diagnóstico para determinar a condição do isolamento do equipamento em operação. Isto é, avaliação do estado da isolação em cabos, transformadores, disjuntores, estatores, etc, geralmente na planta onde o equipamento está instalado (em campo). Avaliação do estado pode incluir tanto teste on-line de DP, assim como as variações do ensaio off-line que são utilizadas para a concepção e teste de garantia da qualidade. Os testes em campo exigem o desenvolvimento de formas cada vez melhores de suprimir ruídos (que pode levar a falsas indicações) e de ferramentas para fazer a interpretação de DP.

Os avanços na ciência da tecnologia de medição de DP permitiram chegar a um ponto em que as medições de DP *off-line* e *on-line* em campo são agora rotineiramente aplicadas a uma elevada percentagem de transformadores, cabos, máquinas e aparelhagem. O impacto destes avanços é a melhora da confiabilidade dos equipamentos de alta tensão, pois a degradação do equipamento pode ser identificada e o equipamento reparado ou substituído antes da falha catastrófica em serviço. Esses avanços também foram aplicados para projetar os testes de garantia da qualidade. É importante notar, contudo, que o teste de diagnóstico não pode dar uma indicação confiável de vida restante. O objetivo é alertar sobre um problema iminente e talvez identificar a causa e isolar o problema [4].

Com respeito à avaliação da condição das máquinas rotativas, as medições de DP podem detectar a maioria dos problemas comuns na evolução da deterioração do estator como: pontos fracos no sistema de isolação e processos de degradação, incluindo [1] [2]:

- a) Pobre Impregnação com epóxi;
- b) Os revestimentos semicondutores mal feitos;
- c) Espaçamento insuficiente entre bobinas na área de entrelaçamento das bobinas, ver figura 1.1(a);
- d) Bobinas soltas na ranhura, ver figura 1.1(b);

- e) Superaquecimento (deterioração térmica em longo prazo);
- f) Contaminação do enrolamento pela umidade, óleo, sujeira, etc;
- g) Problemas de ciclos de carga.



(a)



(b)

Figura 1.1 – (a) Espaçamento insuficiente entre bobinas na área de entrelaçamento das bobinas [1], (b) Descargas de ranhura [80].

É fácil perceber que a qualidade da isolamento em equipamentos de alta tensão é questão-chave para mantê-los em funcionamento. Os altos níveis de campo elétrico devido à operação desses equipamentos promovem degradação contínua dos dielétricos. Essa degradação está associada ao surgimento de heterogeneidades no material isolante, de forma que altas tensões nestas regiões dão origem às descargas parciais. Além disso, descargas podem surgir devido a corpos estranhos no sistema (tais como parafusos, farpas, etc.) o que justifica o esforço no sentido de saber de fato a condição do estado do dielétrico destes equipamentos quando submetidos as diversas condições de operação.

1.2. MOTIVAÇÃO

No modelo atual do setor elétrico, a manutenção preditiva tornou-se grande ferramenta para as concessionárias de energia elétrica na gestão dos seus ativos de produção, pois está cada vez mais difícil desligar um equipamento para realizar manutenção. As concessionárias devem arcar com energia elétrica disponível para atender às demandas da sociedade. Neste modelo, os desligamentos devem ser realizados de maneira programada, de forma a eliminar ou minimizar as perdas. A realização de manutenção preditiva, minimizando as preventivas, busca migrar da condição de manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada nas condições do equipamento.

Paradas de máquinas não planejadas causadas por falhas na isolamento elétrica de equipamentos do sistema elétrico de potência são um grande problema, pois contabilizam

elevadas perdas para a planta e comprometem os indicadores de desempenho devido longos períodos de parada da unidade geradora necessário para restauração da função geração. A fim de solucionar esse problema, vários pesquisadores e estudiosos da área de grandes máquinas rotativas descobriram que estas falhas, na grande maioria das vezes, estavam relacionadas com o aumento do nível de descargas parciais (DP) da isolação elétrica da máquina. As ocorrências das DP nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão são sintomas de fragilidade na sua suportabilidade dielétrica, cuja evolução pode vir a acarretar graves consequências para o equipamento.

Pelo exposto, justifica-se a necessidade de estudar o fenômeno das DP que ocorrem nos enrolamentos do estator de máquinas rotativas que, na maioria das vezes, são sintomas de defeitos elétricos e antecipações de falhas, que são originadas por diversas causas.

A UHCN - Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, por exemplo, sofreu duas falhas causadas por um corpo estranho deixado no estator, o que poderia ter sido evitado se houvesse um sistema de medição de descargas parciais. Houve falha na unidade CNUGH-02 (três meses e seis dias de máquina parada, fonte SAP R3 - Eletronorte). A causa da queima do estator foi um parafuso encontrado no enrolamento do estator, ver figura 1.2.

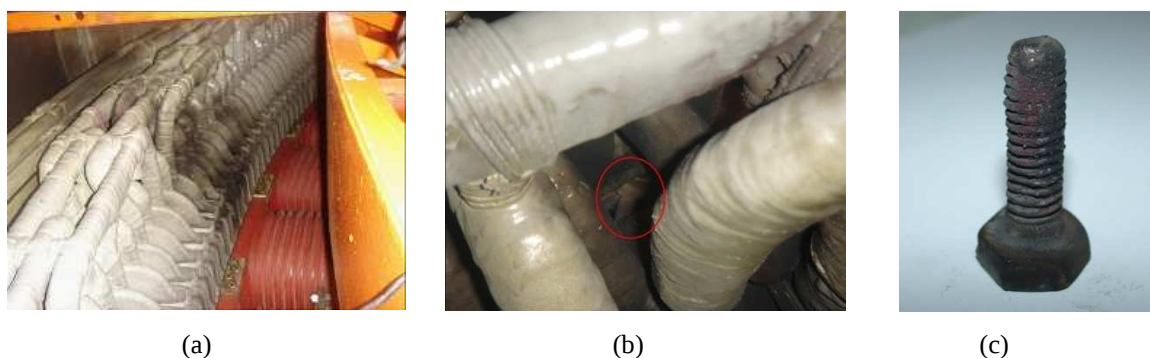


Figura 1.2 – (a) Avaria no estator, (b) parafuso no estator da máquina e (c) parafuso [Arquivo Técnico Eletronorte, 2007].

Outro fato foi a falha na CNUGH-03 (nove meses de máquina parada para reparos, fonte SAP R3 - Eletronorte) devido a um parafuso que danificou a isolação do estator e ficou alojado em uma guia de ar, figura 1.3. O longo tempo de máquina parada, neste caso, também está associado a outros fatores relacionados com os procedimentos de reparo dos danos causados pelo parafuso das guias de ar.

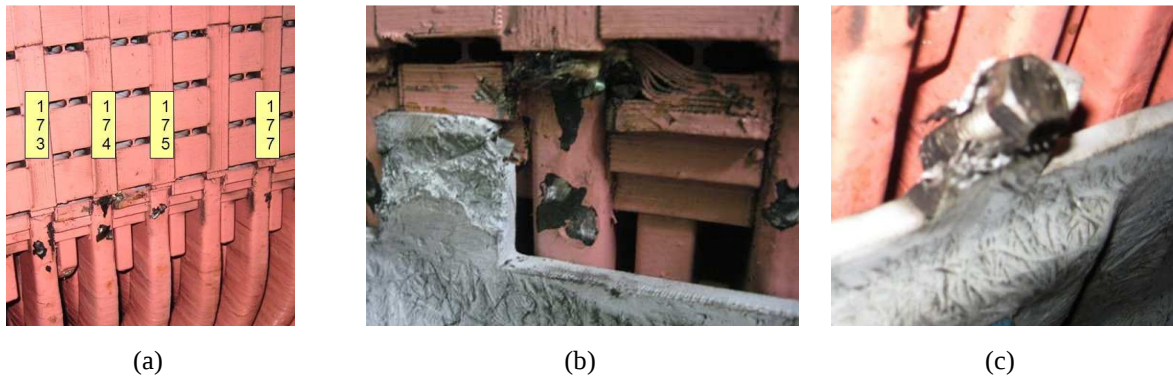


Figura 1.3 – (a) Bobinas (Ranhuras 173, 174, 175, 177 e 187) as quais tiveram a tinta anti-corona removida, (b) núcleo danificado e (c) parafuso alojado na guia de ar [Arquivo Técnico Eletronorte, 2009].

1.3. OBJETIVO DO TRABALHO

1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolver e validar um sistema para avaliar o estado dielétrico dos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores, através do monitoramento de descargas parciais (DP), utilizando o método elétrico de medição, com utilização de sensores convencionais e sensores eletromagnéticos, circuito de medição (cablagem e impedância de medição), sistema de aquisição e processamento (denoising, mapas estatísticos). A figura 1.4, ilustra os objetivos do trabalho.

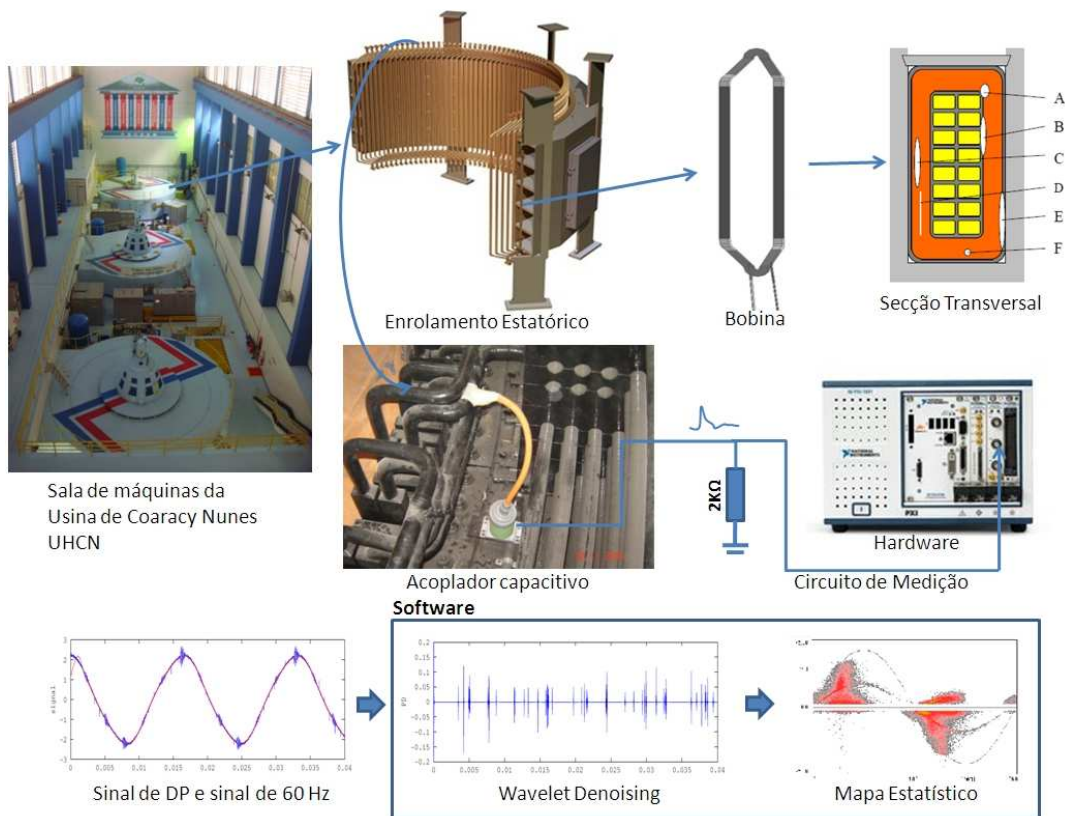


Figura 1.4 – (a) Esquema simplificado do sistema de monitoramento de DP.

1.3.2. Objetivos Específicos

- a) Desenvolver e validar um sensor eletromagnético denominado acoplador direcional de microfita para captação de sinais das DP nos hidrogeradores;
- b) Validar e aprimorar protótipo do sistema incluindo sensores de DP convencionais como acopladores capacitivos e eletromagnéticos (acoplador direcional de microfita), circuito de medição, impedância de medição, *hardware* e *software* de medição, com testes em laboratório e em ambiente real de operação;
- c) Desenvolver e implementar módulo de Instrumentação para medição, condicionamento, processamento, localização e análise dos sinais adquiridos dos sensores das DP, com técnicas modernas de processamento de sinais para identificar as assinaturas das emissões eletromagnéticas das DP e proporcionar o diagnóstico das condições operativas dos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores.

1.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.4.1. Sensores para Medição de DP

Para medir DP com o método elétrico, são comumente usados sensores denominados acopladores capacitivos [5]-[7], que são instalados ao longo dos enrolamentos do estator, em que é necessária conexão direta ao enrolamento, o que demanda mão-de-obra especializada, pois é necessário refazer a isolação no local e garantir que esta não seja comprometida. No intuito de se eliminar tal dificuldade, dentre outras vantagens, um sensor do tipo SSC - *Stator Slot Coupler* foi desenvolvido [45].

Ao contrário dos acopladores capacitivos que são capacitores de alta tensão, o SSC não está ligado diretamente ao enrolamento. O SSC é uma antena (10 MHz a 1000 MHz de banda de operação da antena) que detecta a energia eletromagnética da DP e outros sinais. O SSC é instalado na ranhura do enrolamento do estator contendo barras do estator ligados aos terminais de fase [46].

O SSC consiste de um plano de terra e de uma linha sensora de fita, com cabos coaxiais em cada extremidade da saída. Sempre que uma onda eletromagnética, como a gerada por um pulso de DP, se propagar ao longo do SSC, às proximidades da linha sensora, haverá um pulso de saída em cada extremidade [45].

A impedância característica do SSC é, geralmente, de 50 Ω , casado com a impedância dos cabos coaxiais de saída padrão utilizados em medidores. A presença das duas saídas permite determinar a direção de propagação do pulso de DP (ver figura 1.5) e, possivelmente,

sua localização. Isso é realizável utilizando uma instrumentação capaz de determinar em qual extremidade do SSC é detectado o primeiro sinal [45].



Figura 1.5 – (a) Esquema simplificado do SSC, (b) SSC [45].

A principal vantagem do SSC é a sua habilidade em produzir pulsos de respostas significativamente diferentes para as DP e para o ruído elétrico, permitindo a rejeição desse ruído [46]. Isso se deve à filtragem natural dos sinais no enrolamento do estator e ao fato de que todos os pulsos que não são originados por DP (considerações teóricas, bem como medições práticas mostraram como resultado que os pulsos de DP no enrolamento do estator duram apenas 1 a 5 ns [45]) têm uma largura que excede 20 ns, conforme descrito na norma [47]. Logo, os ruídos mais comuns criam pulsos de tensão com duração relativamente longa quando comparados com os sinais de DP.

Cada SSC tem 50 cm de comprimento, 1,7 mm de espessura, e é feito para ter a mesma largura que a ranhura de estator. O SSC [45] apenas pode ser instalado, quando o rotor é removido da máquina. Em [72], é proposto o uso de acopladores direcionais para registrar descargas parciais em máquinas rotativas em operação.

A sensibilidade dos acopladores capacitivos pode ser incrementada, conforme descrito em [73]. Isto pode ser conseguido aumentando-se a capacitância para valores maiores do que 80 pF (foram usados capacitores de 500 pF). Neste trabalho, análises teóricas e experimentais também foram feitas bem como estudo relativo à largura de banda dos sensores é realizado. Os acopladores que utilizam os capacitores de 500 pF puderam registrar descargas adicionais em relação aos baseados em 80 pF.

1.4.2. Processamento de Sinais

Técnicas de Redes Neurais foram usadas [53] para identificar padrões relativos às descargas parciais. Os dados foram obtidos a partir de barras feitas especialmente para as experiências práticas, as quais foram conduzidas de forma a caracterizar diversas situações que originam diferentes tipos de descargas.

Em 2003 [54], é apresentado um método de avaliação das condições de isolamento de barras de estatores através da velocidade de propagação de ondas pulsantes ultrassônicas. Dados referentes às velocidades mínimas e médias de propagação foram levantados para

barras em operação durante 16, 18 e 23 anos. Após estes testes, parâmetros elétricos, tais como fator de dissipação e capacitância, além de descargas parciais, foram medidos. Foi estabelecida uma relação entre a redução das velocidades mínima e média de propagação com o grau de deterioração dos materiais dielétricos. Análises estruturais microscópicas também foram realizadas e os parâmetros obtidos foram associados às velocidades de propagação.

As condições de desgaste das barras do estator foram usadas em [57] para se avaliar a degradação da isolamento. Com o método apresentado no trabalho, parâmetros estatísticos relacionados a descargas parciais, especialmente assimetrias na distribuição de descargas parciais, foram usados para determinar a forma geométrica das bolhas presentes nos dielétricos usados para isolamento e a formação de defeitos em forma de raízes na estrutura de isolamento (*electrical treeing*).

O método das diferenças finitas no domínio do tempo FDTD, proposto por Kane Yee em 1966 [58, 59] foi usado [60] para modelar descargas parciais em barramentos de uma GIS (*gas-insulated switchgears*). Foram avaliadas características de atenuação na GIS e o vazamento de campo eletromagnético pelas aberturas da estrutura. Boa concordância foi observada com resultados experimentais. O método consiste na solução numérica das equações de Maxwell no domínio do tempo através da aproximação das derivadas por diferenças centradas [61]. Na área de descargas parciais, este método tem sido aplicado para modelar transitórios envolvendo transformadores [62, 63], junções de cabos de energia [64], resposta de sensores de PDs [65], acopladores direcionais [66], simulações de múltiplas fontes de PD [67], chaves isoladoras em GIS [68] e transformadores de corrente [45]. Na maioria dos casos, excelentes respostas foram obtidas em comparação com medições.

Em 2005, F.T. Emery apresenta em [55] aspectos relativos ao projeto de barras de saída de geradores e a forma de reduzir descargas parciais e o efeito corona (ambos sendo fortemente relacionados) durante a operação. Tal como descrito detalhadamente no trabalho, o uso de fitas de mica combinado com resina epóxi especial para altas temperaturas, reduzem-se às formações de bolhas de ar e, portanto, de descargas parciais, preservando as características dielétricas dos isoladores. Melhorias no sistema de isolamento das barras são propostas, de forma a aumentar a vida útil de operação das barras.

A questão do ruído foi tratada diferentemente [70]. Uma fibra óptica fluorescente é usada para detectar luz visível gerada pelas descargas. Descargas com correntes mínimas de 9 μA podem ser detectadas com a técnica. Além da boa imunidade ao ruído, a técnica garante isolamento galvânica dada a composição da fibra. A principal limitação do método é que a luminescência do sinal é reduzida em materiais com Flúor em relação ao ar. Dessa forma, o

material da fibra deve ser escolhido adequadamente dependendo do espectro de frequências de interesse, de forma a minimizar os limiares de detecção.

Em [74], uma técnica muito interessante é proposta para tratar os sinais medidos contendo informações sobre descargas parciais: o uso de filtros casados. Um filtro casado é uma forma ótima de detectar um sinal na presença de ruído, desde que a forma de onda do sinal de interesse seja conhecida. Esta técnica é usada em sistemas de comunicação. Se $s(t)$ é a função de interesse, $h(t) = A s(-t)$ deve ser a resposta ao impulso do filtro. Um filtro deste tipo maximiza a relação sinal/ruído, tal como demonstrado em [75].

O uso de sensores indutivos em cada bobina da máquina é introduzido em [76], de forma que é possível identificar com mais precisão a região do gerador que está gerando as descargas. Esta técnica reduz problemas relativos a calibração dos sensores, ruídos, atenuação e distorção dos sinais relativos às descargas.

1.4.3. Sistemas de Monitoramento

Em 1989, um teste para detecção de descargas parciais (*screening test*) foi definido pelo IEEE [49] para barras e bobinas do estator. A faixa de operação do teste foi fixada de 8 MHz a 100 MHz. Na época, verificou-se que nesta faixa de frequências, as medições são mais sensíveis a descargas parciais que ocorrem em cavidades internas nos dielétricos (*internal voids*) do que métodos empregados até então. Em [50], mudanças no esquema de medição original foram propostas para garantir a repetibilidade dos experimentos. Observou-se que a escolha adequada da voltagem de operação de determinadas bobinas e barras, baseada no teste proposto, aumentam o tempo de vida útil desses dispositivos.

Em [51], a isolamento de um gerador de 16 kV / 250 MVA é investigada. Acopladores capacitivos instalados permanentemente nas barras de saída do gerador foram usados para monitorar descargas parciais. Um osciloscópio de quatro canais foi usado para registrar sinais transitórios provenientes de descargas parciais. A figura 1.6 ilustra o arranjo da monitoração.

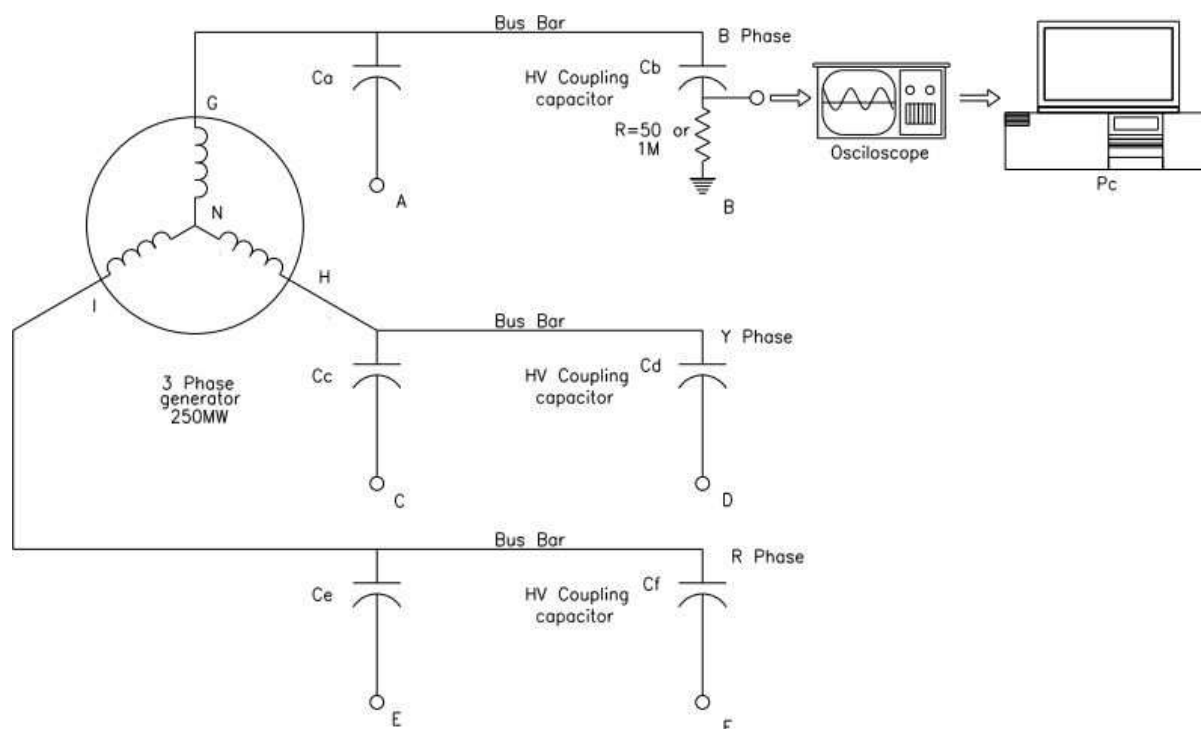


Figura 1.6 – Esquema do arranjo de medição [51]

Os sinais obtidos foram filtrados utilizando *wavelets*, de forma que a técnica apresentada é capaz de distinguir (pequenas) descargas superficiais em três fases distintas. Foi observado que a impedância de entrada na medição afeta a sensibilidade da medição. [88] Utiliza uma estratégia para seleção de sub-bandas *wavelet* para filtragem de ruídos em medições de DP.

Em 2005, Emery [55] apresenta aspectos relativos ao projeto de barras de saída de geradores e apresenta forma de reduzir descargas parciais e o efeito corona (ambos sendo fortemente relacionados) durante a operação. Tal como descrito detalhadamente no trabalho, o uso de fitas de mica combinado com resina epóxi especial para altas temperaturas, reduz as formações de bolhas de ar e, portanto, de descargas parciais, preservando as características dielétricas dos isoladores. Melhorias no sistema de isolamento das barras são propostas, de forma a aumentar a vida útil de operação das barras.

Em [56], o desgaste das barras de saída do estator é usado para se avaliar o envelhecimento da isolamento do enrolamento do estator. Os resultados dos testes mostram que a assimetria da fase de descarga parcial e a crista de alta frequência de descarga parcial mudam acentuadamente mais com o tempo de envelhecimento do que os parâmetros convencionais. Dessa forma, o trabalho propõe o uso destes dois parâmetros para se avaliar as condições de isolamento do gerador, o que se mostrou efetivo, de acordo com os resultados dos testes realizados.

Barras de saída que operaram durante 7 e 22 anos foram retiradas do gerador para verificação do estado de isolamento [52]. Nesta ocasião, foram avaliadas a tensão de ruptura AC, tensão de interceptação de descargas parciais (PDIV), as cargas elétricas máxima e total aparente relativas às descargas parciais, além da avaliação de $\tan\delta$. Todas as grandezas foram avaliadas estatisticamente após a realização de um procedimento experimental descrito no trabalho. Foi observado que a tensão de ruptura AC, a tensão de interceptação de descargas parciais e o valor de carga elétrica máxima têm forte dependência do tempo de serviço da barra. A tensão de ruptura AC e a tensão de interceptação de descargas parciais são reduzidas com o tempo de trabalho da barra e a carga elétrica máxima associada às descargas aumenta com o tempo de uso. Nada de conclusivo a respeito da $\tan\delta$ e da carga elétrica total aparente.

Ao medir descargas parciais on-line em hidrogeradores para verificar as condições em que estes se encontram (condições da isolamento e situação dos enrolamentos, entre outras), frequentemente se verificam altos níveis de interferência eletromagnética, comuns em máquinas grandes como um hidrogerador. Dessa forma, é apresentado um sensor capaz de diferenciar descargas nos enrolamentos da máquina de outras fontes de interferência elétrica [45]. O ruído é diferenciado das descargas de interesse utilizando a forma dos pulsos recebidos no sensor. O sensor é chamado Stator Slot Coupler, foi instalado em seis turbinas e não apresentou riscos para o sistema.

Foram utilizados para realizar as medidas os osciloscópios de digitalização Hewlett-Packard HP 54111D, 1GHz de taxa de digitalização e Tektronix DSA602, 2 GHz de taxa de digitalização.

Em [69] são descritas algumas experiências práticas de medições de descargas parciais em motores de media voltagem e em geradores. O instrumento utilizado para realizar as medições foi o Tektronix Model TDS54A, que possui uma largura de banda de 500 MHz.

Em 2004, é proposto um sistema em [77] baseado na medida de grandes conjuntos de descargas parciais e na separação destas em classes, utilizando para isto a forma de onda dos pulsos, o que permite separar o padrão completo PRPD (*phase resolved partial discharge*) em sub-padrões, cada um relevante para apenas um tipo de descarga parcial. Isto facilita o uso de tecnologias de reconhecimento de padrões, tais como Fuzzy, podendo ser identificado, dessa forma, com mais confiabilidade, o defeito causador de DP. Em [71] são utilizadas técnicas de inteligência computacional como Máquina de Vetores de Suporte (SVM - *Support Vector Machine*) para classificação automática dos padrões de DP.

1.5. ESCOPO DO TRABALHO

Dando sequência ao trabalho, o Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre os sistemas de monitoramento on-line de DP, descrição dos termos e conceitos relacionados às descargas parciais, procurando sempre relacionar com a isolação elétrica dos enrolamentos do estator e os principais tipos de falhas que os enrolamentos estão submetidos.

O Capítulo 3 trata especificamente dos sensores utilizados para medição das descargas parciais, o acoplamento capacitivo e o irradiado. Neste capítulo são apresentados também os instrumentos utilizados para medição de descargas parciais e os resultados da avaliação de sensibilidade, através da aplicação de um sinal conhecido e calibração e ensaios com alta tensão, para quatro acopladores capacitivos e dois sistemas experimentais.

O Capítulo 4 apresenta uma nova metodologia para localização de Descargas Parciais, baseada em análise espectral. O método FDTD foi utilizado para realizar as simulações e a modelagem eletromagnética do problema. Foi realizada a localização de múltiplas descargas parciais ocorrendo em uma única bobina do hidrogenador e em duas bobinas adjacentes interligadas.

O Capítulo 5 apresenta os principais resultados em relação às áreas de processamento e análise de sinais. Especificamente, implementação em LabView de um simulador de sinais, concepção e avaliação de uma estratégia para estimar a fase de uma onda senoidal a partir de suas amostras.

O Capítulo 6 apresenta os procedimentos metodológicos, o arranjo experimental montado em laboratório, os instrumentos de coleta de dados, como foi realizado o processo de tratamento de dados e por fim, o protótipo do sistema de medição de DP.

O Capítulo 7 apresenta os principais resultados da monitoração *online* de descargas parciais instalado na Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes no Estado do Amapá.

No Capítulo 8 são apresentadas as considerações finais e informado sobre a continuidade desde trabalho.

2. DESCARGAS PARCIAIS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A descrição de alguns métodos de medição de descargas parciais pode ser encontrada em [42]. Embora existam alguns dispositivos comerciais, tais como acopladores capacitivos instalados em máquinas rotativas, por exemplo, os produtos da *Power Diagnostic Systems* [6], diagnósticos confiáveis, da condição do isolamento do enrolamento do estator, com base em DP, ainda estão em desenvolvimento.

Baseando-se em mais de 30 trabalhos publicados nos últimos 10 anos, é apresentado neste capítulo o estado da arte dos problemas discutidos. São comparadas criticamente algumas das soluções destes problemas [98].

2.2. TEORIA DE DESCARGAS PARCIAIS

Quando uma tensão é aplicada aos terminais de um equipamento elétrico que possui isolamento elétrico (dielétricos - ar, SF₆, óleo isolante, fenolite, resinas, vidros, papel, epóxi, poliéster, etc...) entre as partes energizadas, irão ocorrer descargas em parte desse dielétrico. Elas ocorrerão nos pontos onde houver maior intensidade de campo elétrico ou onde a constante dielétrica (ϵ) for menor do que o restante do material isolante, como no caso de pequenas cavidades gasosas no interior de um isolante sólido. Fisicamente, as Descargas Parciais se caracterizam por um processo de ionização em ambiente gasoso no interior dos materiais dielétricos, causado por um intenso campo elétrico. A partir desse processo, diversas grandezas físicas são geradas no local, tais como, pulsos eletromagnéticos conduzidos e radiados, luminosidade, ruído acústico, acréscimo de temperatura e reações químicas localizadas. Para efeito de compreensão pode-se dizer que as descargas parciais são descargas disruptivas ocorrendo em pequena parte de um sistema isolante que não chegam a percorrer todo o caminho dentro do material isolante colocado entre os condutores submetidos a uma diferença de potencial. No caso de dielétricos sólidos essas descargas são produzidas pela ionização de pequenas cavidades de ar no interior do dielétrico; no caso dos líquidos, pela ionização de bolhas de gás no seu interior; no caso dos gases, pela ionização das moléculas de gás que se encontram nos pontos de maior gradiente de potencial.

Dessa forma as descargas parciais são:

- a) Pequenas faíscas elétricas resultante da fadiga elétrica de um gás (por exemplo ar) contida no interior de um vazio ou de um campo elétrico elevado não-uniforme. Se o

vazio é dentro de um sólido orgânico ou líquido, o DP irá degradar o material orgânico e pode eventualmente, causar a falha do isolamento elétrico [4];

- b) Sucessões de descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes, que ocorrem em um meio gasoso em série com isolantes sólidos ou líquidos. A conceituação de descarga incompleta se dá pela restrição quanto à zona do dielétrico;
- c) As DP ocorrem em regiões definidas e não chegam a completar um circuito fechado (curto-circuito). São também consideradas rápidas pelo fato de ocorrerem em períodos curtíssimos de tempo, ao comparar-se com o período da tensão de teste (1/60 segundos).

A figura 2.1 apresenta um Padrão Típico de Descarga Parcial em uma barra estatórica de um gerador.

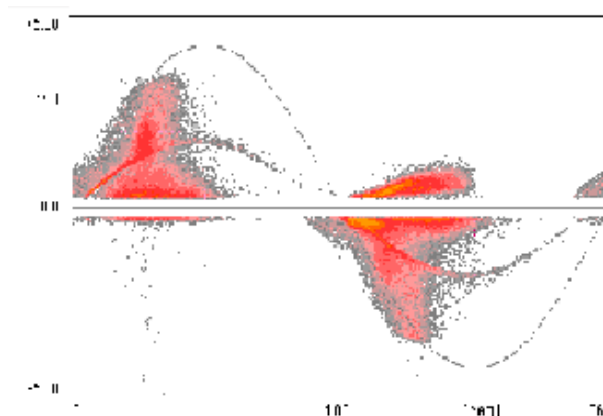


Figura 2.1 – Padrão típico de DP em hidrogeradores [14]

As DP podem produzir pulsos de correntes, luminescência, ondas eletromagnéticas, ondas acústicas, consumo de energia, variações térmicas, variações químicas, vibrações mecânicas, etc. Em sentido amplo, as técnicas de detecção e medição podem ser divididas em dois grupos: elétricos e não elétricos.

O método elétrico insere o circuito de medição e detecção no circuito onde as descargas não ocorrem. Já os métodos não elétricos, geralmente, servem apenas de suporte aos métodos elétricos. Existem diversos métodos de detecção e medição não elétricos, dos quais pode se destacar:

- a) Método acústico: capta ondas ultrassônicas, não audíveis, através de sensores apropriados. Esta técnica tem merecido uma grande atenção no auxílio da localização de DP no equipamento;
- b) Método óptico: detecta a ocorrência de descargas através das emissões de luz provocadas no momento de ocorrência;

- c) Método químico: detecta a presença de produtos dissolvidos no dielétrico. Por exemplo, uma análise do óleo isolante é capaz de determinar se houve ocorrência de descargas parciais no transformador;
- d) Método de rádio frequência: um receptor capta interferências provocadas pelas ondas eletromagnéticas. Assim é possível identificar o lugar de ocorrência de DP;
- e) Medidas em UHF: uma antena capta sinais de UHF correspondentes a pulsos de DP.

2.3. DEFINIÇÃO DE PULSOS DE DP

Pulsos de corrente ou tensão resultante de uma descarga parcial que ocorre dentro do objeto sob teste. O pulso é medido utilizando circuitos de detectores adequados, nos quais foram introduzidos o circuito de teste para efeitos de teste [13].

2.3.1. Carga Aparente q

A carga aparente de um pulso de corrente DP é a carga unipolar que, se injetada em um curto espaço de tempo entre os terminais do objeto de teste em um circuito específico, dará a mesma leitura no instrumento de medição quando for realmente o pulso de corrente de DP. A carga aparente é usualmente expressa em picoCoulombs [pC].

2.3.2. Taxa de Repetição n

A taxa de repetição dos pulsos de descargas parciais é geralmente expressa em pulsos por segundo. Ela é a relação entre o número total de pulsos de DP registrados em um intervalo de tempo e a duração deste intervalo. Na prática, somente pulsos acima de uma amplitude especificada, ou dentro de um range de amplitudes especificadas são considerados. A especificação da amplitude é estabelecida através do índice denominado LLD (*Low Level Discriminator*), que estabelece a percentagem da amplitude máxima que será considerada. Considere, por exemplo, a amplitude máxima dos pulsos definida como 100 pC e um LLD de 5%, neste caso só serão considerados os pulsos com amplitude superior a 5 pC. Essa prática é importante posto que evita que sejam considerados os pulsos que estão relacionados à ruídos de baixa amplitude, que são bastante comuns em ambientes fora das condições de laboratório, otimizando, de certa forma, o tempo de processamento do sistema de aquisição, pois a taxa de ocorrência de pulsos de baixa amplitude é muito elevada [15].

2.3.3. Ângulo de Fase ϕ_i e Tempo t_i de Ocorrência de um Pulso DP

O ângulo de fase de um pulso individual de DP é definido como: $\phi_i = 360 \cdot (t_i / T)$. Em que t_i é o tempo medido da transição positiva do zero de tensão e T é o período da tensão de teste. O ângulo de fase é geralmente expresso em graus. Note que o ângulo de fase é importante para o diagnóstico e monitoramento.

2.4. MEDIÇÕES DE DESCARGAS PARCIAIS

Medições de descargas parciais no enrolamento do estator podem ser divididas em dois grandes grupos: medições *off-line* e medições *on-line*. Nas medições *off-line*, o enrolamento do estator é isolado do sistema de potência e uma fonte de tensão independente é empregada para energizar o enrolamento. Nas medições *on-line*, a máquina está operando interligada ao sistema de potência.

As principais diferenças entre as medições *on-line* e *off-line* são devidas a uma diferente distribuição da tensão ao longo do enrolamento e vários efeitos térmicos e mecânicos relacionados com a operação, tal como vibração, gradientes de temperatura entre o cobre do estator e do núcleo de ferro. Além disso, especialmente para máquinas refrigeradas a hidrogênio, o gás e a pressão do gás são diferentes para medições de DP *off* e *on-line* [2].

2.5. TIPOS DE DP EM MÁQUINAS ROTATIVAS

A bobina do estator de uma máquina rotativa, apresenta as atividades de DP, em condições diferentes. Cada localização da atividade de DP tem uma configuração específica com diferentes materiais envolvidos. Assim, a atividade de DP é específica para cada configuração diferente. A figura 2.2, mostra um corte transversal de uma barra de estator com locais de defeitos típicos marcados [2,14]:

- a) Campo elétrico intenso se encontra no canto do condutor (corona na cabeça das bobinas). Dependendo do processo de fabricação, uma borda adicional parcialmente afiada pode causar de forma precoce o início de uma DP;
- b) Delaminação condutor-isolante é o desgaste da isolação principal do condutor, ou seja, a delaminação das camadas isolantes do sistema dielétrico, usualmente ocorre quando uma máquina está sobrecarregada;
- c) Descolamento de isolamento é a delaminação interior da isolação principal, parte do processo de envelhecimento térmico normal da isolação de mica-epóxi;

- d) Indica uma região sem camadas de mica;
- e) Descarga na ranhura causada por vibração da barra dentro da ranhura devido à cunha inadequada ou vibração parcial do núcleo;
- f) Cavidades (vazios).

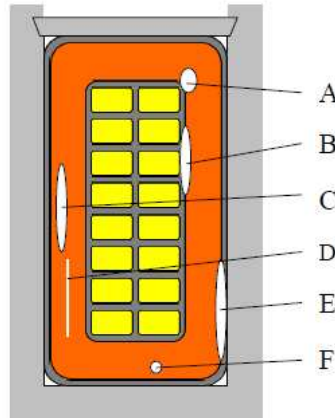


Figura 2.2 – Secção transversal de uma barra de máquina [14].

2.6. FALHAS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR

Uma falha no isolamento do estator é um caminho de baixa impedância entre os condutores que devem ser isolados uns dos outros, tais como entre espiras, barras, fases ou entre fase para o núcleo. Esta seção indica o potencial da manutenção preditiva no isolamento do estator e lista alguns modos comuns de falha.

2.6.1. Falhas Em Máquinas Rotativas

Existem duas formas de classificar as falhas em máquinas rotativas de alta tensão, uma é a condição em que a máquina foi encontrada após a falha e a outra é pela suspeita da causa raiz que originou a falha [78]. Estudar a causa raiz pode ser muito mais interessante, mas para fins de diagnóstico o mais importante é se o desenvolvimento da falha seria previsível a partir do componente estudado. A distribuição das falhas e causas sobre os componentes variam entre os diferentes tipos de máquinas, porém uma indicação aproximada é apresentada a seguir.

Um estudo internacional sobre causas de falhas em hidrogeradores examinou 69 incidentes em detalhes e concluiu que as principais causas de falhas podem ser categorizadas na seguinte ordem: falhas no sistema de isolamento, defeitos mecânicos, problemas térmicos e por último, falhas devido aos mancais de rolamento [79], a figura 2.3, ilustra essa classificação.

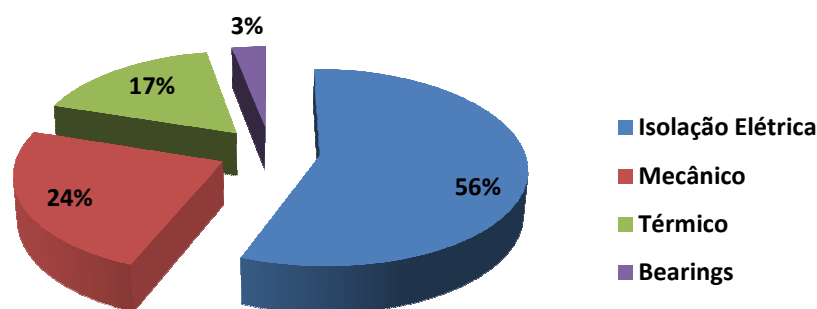


Figura 2.3 – Causas raízes de falhas em hidrogeradores.

As falhas no sistema de isolação elétrica foram investigadas com mais detalhes e os resultados são ilustrados na figura 2.4.

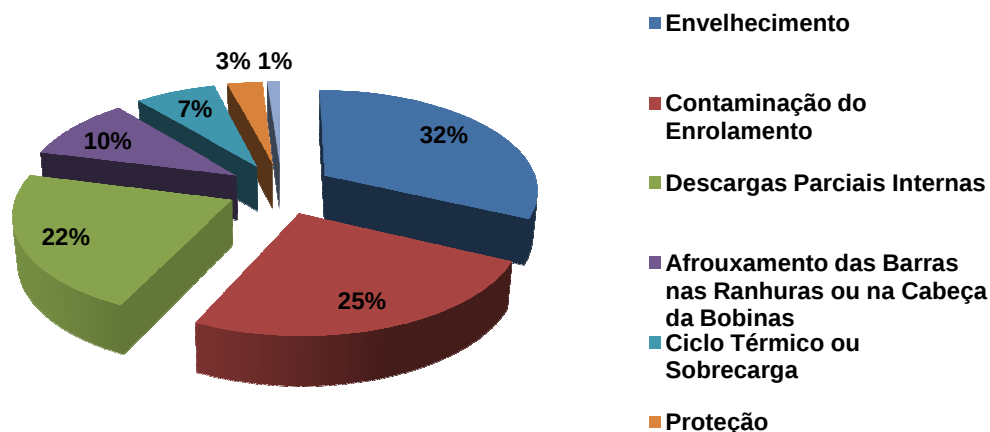


Figura 2.4 – Causas de falhas no sistema de isolação elétrica.

As causas mais frequentes de falhas são causadas pelo efeito do envelhecimento e contaminação do enrolamento por poeira e umidade. As falhas elétricas são causadas pelas descargas parciais internas, proteção e sobretensões. Devido à vibração é possível que as barras sofram afrouxamento na sua posição dentro da ranhura, na cabeça da bobina.

2.6.2. Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator

Na pesquisa de [80] são descritas as falhas nos enrolamentos do estator que ocorrem por estresses elétricos (em função da tensão), mecânicos (vibração), térmicos (sobreaquecimento), químicos e ambientais (contaminação e umidade), que ocasionam a deterioração do isolamento e que apresentam como sintoma a presença de descargas parciais com maiores magnitude e frequências.

Será apresentada a seguir a tabela 2.1 com o mecanismo de falha, sintomas, teste de detecção e o tipo da máquina, conforme descrito por [80].

Tabela 2.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator [80].

Mecanismo de Falha	Sintomas	Teste de Detecção	Tipo de Máquina
Impregnação Inadequada	DP	Medição de DP, $\tan \delta$, fator de Potência	Impregnação a vácuo e fita com resina
Falhas na camada semicondutora	DP, descarga na ranhura, ozônio	Medição de DP, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas a ar
Enrolamento frouxo	DP, ozônio, cunhas soltas	Medição de DP, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Sistemas com isolamento termorrígida (epóxi e poliéster)
Centelhamento por Vibração	DP, ozônio, cunhas soltas	Medição de DP, inspeção visual, monitorar ozônio e testes da cunhagem	Com isolações à base de fita com resina ou Impregnação a vácuo
Interface de alívio de Tensão	DP, pó branco (ácido nítrico), ozônio	Medição de DP, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual e monitorar ozônio	Refrigeradas a ar e com pintura na interface de alívio de tensão
Espaçamento Inadequado	DP, pó branco, descoloração da isolação e ozônio	Medição de DP, inspeção visual, monitorar ozônio	Refrigeradas a ar, seccionadoras e conexões de motores
Vibração das cabeças de bobina	Perda do sistema de bloqueio e amarração, pó branco disperso ou graxa	Inspeção visual, acelerômetro de fibra ótica	Alta tensão, alta velocidade com grandes cabeças de bobinas
Má conexão elétrica	DP, pó branco e descoloração das conexões	Medição de DP, inspeção visual, temperatura com infravermelho	Qualquer conexão
Deterioração térmica	DP, descoloração da isolação	Medição de DP, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual	Todos os tipos de máquina
Ciclos de carga	DP, ruptura da isolação na saída da barra	Medição de DP, $\tan \delta$, fator de potência, inspeção visual, Surge Test, Hipot	Todos os tipos de máquina (com barras longas)

2.7. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE DP

Existem vários métodos disponíveis para medir o nível de DP em motores e geradores em operação [1]. As técnicas elétricas dependem do monitoramento do pulso de corrente ou tensão que é criado sempre que uma descarga parcial ocorre.

Os primeiros métodos para medição dos pulsos de correntes de DP eram por meio de uma corrente de alta frequência no neutro do transformador, mas hoje a maioria das máquinas ao redor do mundo utilizam capacitores de alta tensão (80 pF [5], 220pF [6], 500pF [7]) para medir DP, ver figura 2.5.



80 pF [5]



220 pF [6]



500 pF [7]

Figura 2.5 – Tipos de fabricantes de acopladores capacitivos instalados na mesma máquina.

Um desafio particular na medição de DP é encontrado em medições *on-line* com motor, gerador, ou turbogerador em funcionamento. Uma vez que a máquina é ligada ao sistema de energia, interferências elétricas (ruídos) estão muitas vezes presentes. Fontes de ruído incluem corona a partir do sistema de potência, anel coletor, comutador, ignição, faíscas de pobres conexões elétricas, e/ou operação do sistema de potência. Este ruído obscurece os pulsos DP e podem causar conclusões técnicas de que o enrolamento do estator tem elevados níveis de DP, quando na verdade é apenas ruído. A consequência é que um bom enrolamento é avaliado incorretamente como sendo defeituoso, o que significa que um falso alarme é dado sugerindo que o enrolamento está com sua isolamento comprometida, quando não está. Tais alarmes falsos reduzem a credibilidade dos testes DP *on-line*[1], além da falta de análise ao longo do tempo tem resultado na diminuição do interesse da equipe de manutenção da planta em continuar as medições [3].

Dados de descargas parciais tal como acontece com a maioria dos sistemas de medição de DP, o número, a magnitude, e a posição de fase com relação ao ciclo de 50 ou 60 Hz de corrente alternada são registrados, uma vez que os pulsos de DP são separados dos pulsos de ruído. A figura 2.6 mostra um gráfico típico de DP a partir de uma fase de um enrolamento do estator do motor. A magnitude do pulso é medida em termos absolutos, unidades de milivolts (mV). A partir de cada teste, dois indicadores de síntese são extraídos, representando todas as DP pulsos dados coletados. Os picos positivos e negativos de magnitudes DP (+Qm e -Qm) representam os mais elevados pulsos medidos de DP em mV com uma taxa mínima de repetição DP de 10 pulsos por segundo. Qm é um preditor razoável da condição de isolamento do estator, ver figura 2.6. Uma alta Qm medida num enrolamento em comparação com uma menor Qm em outros enrolamentos, geralmente implica que o enrolamento é mais deteriorado[1], [3].

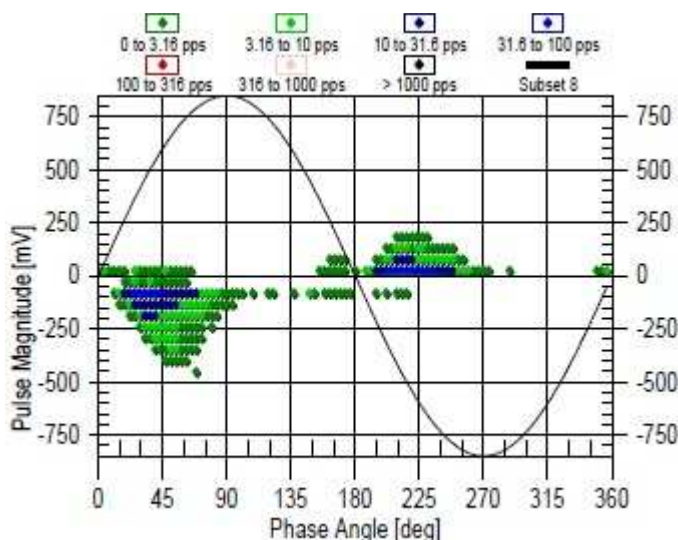


Figura 2.6 – Gráfico típico de DP [1]

A natureza destrutiva da DP na isolamento de cabos de alta tensão, mais geralmente em dispositivos de alta tensão, já é conhecida há mais de 80 anos [8]. Portanto, fabricantes de cabos de alta tensão, transformadores, capacitores e comutadores, em que o isolamento é composto principalmente de materiais orgânicos (papel, óleo, polietileno, borracha, epóxi e / ou poliésteres) devem tomar o cuidado ao projetar um sistema de isolamento que não contenha espaços vazios, nas regiões de estresse elétrico de alta tensão [4].

Consequentemente, não é surpresa que os métodos de medição para determinar DP, têm sido objeto de desenvolvimento desde a década de 1930. Existem várias razões pelas quais as medições DP são feitas [4]:

- Teste de *Design*: Para avaliar o projeto de um novo sistema de isolamento, para garantir a inexistência de DP (ou abaixo do nível especificado), sob operação normal;
- Teste de garantia da qualidade (QA): Para garantir que nenhuns espaços vazios sejam introduzidos durante fabricação / processamento da isolação do sistema [9];
- Teste de Diagnóstico: Para determinar se o isolamento elétrico em equipamentos tais como motores, transformadores, disjuntores e cabos não se deterioraram devido ao estresse elétrico, térmico, mecânico ou ambiental durante a operação.

O objetivo de cada um destes testes é o de assegurar que o equipamento tenha a duração de vida prevista, isto é, se o equipamento é confiável. Caso DP sejam detectadas, ou os níveis de DP são demasiadamente elevados, é provável que o sistema de isolamento falhe prematuramente.

Pesquisadores [20], [45] e [22] desenvolveram os métodos de detecção de DP e métodos de exibição de dados que ainda são amplamente utilizados hoje em laboratórios e

fábricas. A maioria do trabalho foi focada no desenvolvimento de métodos de ensaio para o projeto ou teste de garantia da qualidade.

2.8. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DP

2.8.1. Instrumentação Digital

De acordo com [42] o pulso de uma descarga parcial tem um tempo de subida extremamente rápido e uma largura curta. O período de oscilação, o tempo de subida e as magnitudes dos picos subsequentes variam para cada pulso. Essas características normalmente dependem da geometria da máquina, da localização dos pulsos e do material isolante.

Os pulsos de DP possuem espectro de frequência que varia de DC a GHz. Portanto é possível detectar atividades de DP em diversas bandas de frequência com algumas vantagens e desvantagens para cada tipo de banda. Isto também significa que nenhum instrumento pode detectar toda a energia dissipada devido a uma descarga parcial [107].

A maioria dos instrumentos de detecção de DP apenas detecta o início do pulso que tem um tempo de subida de 1 a 5 ns. Considerando-se no tempo de subida, para uma primeira aproximação, a frequência do pulso, conforme Equação 2.1 é:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 \times t_{sub}} \quad (2.1)$$

Por exemplo, um pulso com tempo de subida de 3 ns deverá ter um período de $T = 4 \times 3ns = 12ns$, e uma frequência de $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{12ns} = 83MHz$. Dessa forma, um tempo de subida de 1 a 5 ns corresponde a uma faixa de frequência de 50-250 MHz. A Figura 2.7 apresenta um típico pulso de descargas parciais.

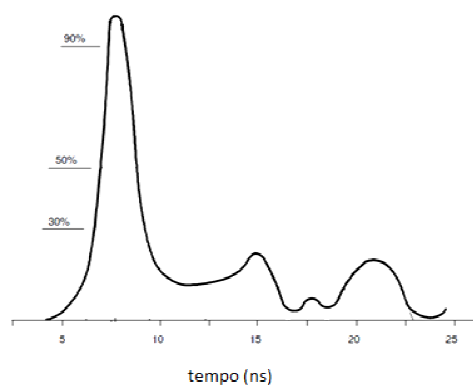


Figura 2.7 – Típico pulso de descargas parciais [108]

Atualmente as medições dos pulsos de DP são realizadas através de meios digitais. A forma mais simples é utilizar um osciloscópio digital para medir e exibir os pulsos de DP. Osciloscópios digitais podem muito facilmente detectar e visualizar permanentemente as

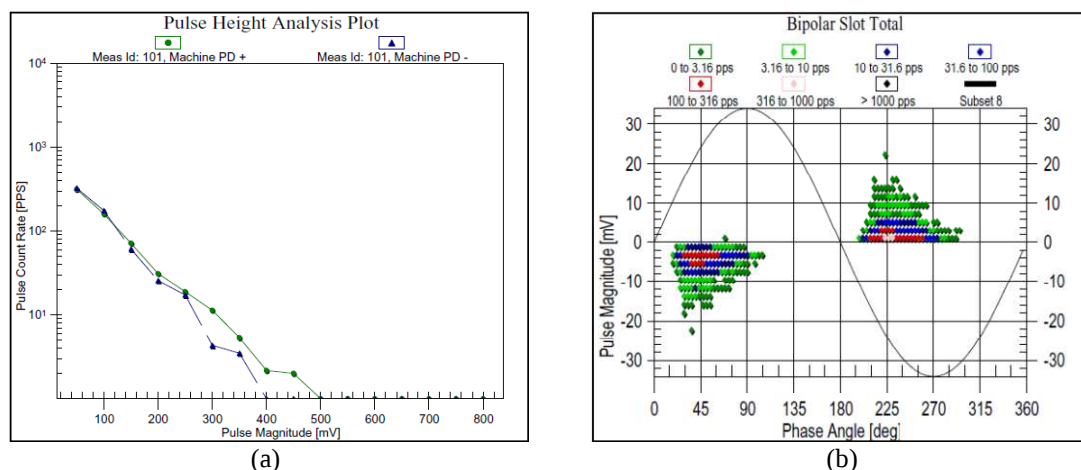


Figura 2.9 – (a) PMA - Análise da magnitude do pulso, (b) PPA - Análise da fase do pulso [4]

Desde que o instrumento PDA-H (utiliza a técnica PMA) foi introduzido pela primeira vez, outro tipo de aquisição e técnicas de representação de DP foi desenvolvido: a fase tridimensional (PRPD), como citado anteriormente. Apesar do fato de que a técnica de medição PDA-H não é tão poderosa quanto o PRPD, principalmente em relação ao reconhecimento de fontes de DP [1], empresas como a Hydro-Québec adota a técnica PDA-H como uma primeira linha de defesa no diagnóstico de gerador. A simplicidade da técnica de medição combinada com a base de dados muito valiosa a partir de mais de 100 geradores permanece entre as principais vantagens e ela é usada para classificar os geradores mais problemáticos daqueles que estão na melhor condição. A medição PRPD é utilizada apenas em geradores com atividades de descarga maiores ou mais intensas, identificados através do PDA-H ou quando um drástico aumento do nível de DP é observado. Os resultados são então usados para guiar os especialistas através das diferentes escolhas possíveis de ferramentas, entre a inspeção visual e outras técnicas off-line, a fim de ajudar a melhorar o diagnóstico [3].

O uso generalizado de instrumentação digital, o qual produz os gráficos PMA e PPA reduziu a necessidade de especialistas na área para estar presente no teste de DP. Com a tecnologia analógica, a presença do perito durante o teste era necessária para que este pudesse determinar os picos de magnitudes DP dos traços piscando no osciloscópio e determinar se havia ruído presente durante a medição. Com a instrumentação digital e registro permanentemente habilitado, o perito poderia rever os dados transmitidos por e-mail para um laboratório ou escritório. Isso melhorou a produtividade dos especialistas de teste DP, que reduziu consideravelmente o custo dos testes.

A maior parte da instrumentação DP comercial em uso hoje utiliza um conversor analógico-digital com taxas de amostragem de cerca de 20 MHz. Estes são completamente compatível com a norma IEC 60270 [15], detectores banda estreita e larga. No entanto, alguns

fornecedores estão usando instrumentos com larguras de banda de até 350 MHz para permitir detecção DP ultra-banda larga, com as vantagens consequentes da separação de ruído e localização das DP [4].

2.8.2. Supressão de Ruído

Apesar de serem métodos eficientes (PMA e PPA), vários ruídos externos são medidos junto com as DP, o que dificulta a análise. As principais causas de ruído são descritas a seguir [16]:

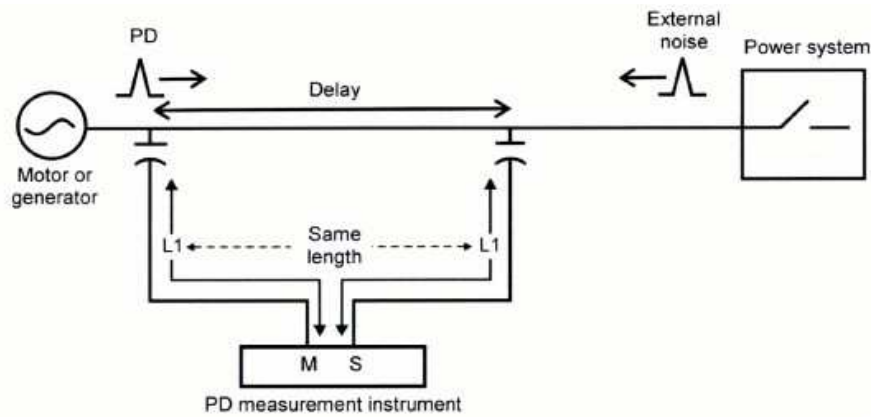
- a) Arco de componentes metálicos adjacentes num campo elétrico com alguns dos componentes fracamente ligados à terra ou de alta tensão;
- b) Arco de maus contatos metálicos que estão carregando altas correntes;
- c) Arco do anel coletor e escovas de aterramento do eixo de máquinas rotativas;
- d) Sistemas de comunicação PLC;
- e) Chaveamento de tiristores;
- f) Rádio transmissões.

Baseado nessas causas, os principais tipos de ruídos podem ser categorizados em:

- a) Ruído Senoidal: de origem de sinais de portadora AM/FM;
- b) Ruído aleatório ou repetitivo: provenientes de eletrônicos, operações de comutação ou emissões RF de equipamentos de potência;
- c) Ruído Branco: tem origem de algum sinal aleatório com densidade espectral plana.

Pelo exposto, é intuitivo que o ruído deverá ser alvo de processos de minimização de seus efeitos. Várias técnicas para eliminação de ruídos vêm sendo estudadas a fim de se obter sinais de DP de boa qualidade para estudo e consequentemente ações de diagnóstico das condições operativas de equipamentos [17].

Porém, é importante ressaltar que a eliminação dos ruídos pode ser feito tanto por *hardware* quanto por *software*. Mediante o *hardware*, há empresas que têm aplicado apenas filtros passa banda, em que passam apenas as frequências em que a DP aparece, o que não é muito eficaz, pois alguns ruídos aparecem na faixa de frequência que as DP aparecem. Outro método utilizado é o diferencial, o qual produz um atraso de sinais de DP com o uso de dois sensores em cada fase do gerador [17], ver figura 2.10.



IEC 446/12

Figura 2.10 – Separação do ruído no domínio do tempo através do tempo de chegada do pulso [2].

A redução ou remoção de ruído de sinais é referida como *denoising* e diversas técnicas têm sido propostas e aplicadas no tratamento de DP. A transformada de Fourier pode ser usada, mas apresenta perdas de informações no domínio do tempo, por isso, tem-se encaminhado a utilização da transformada wavelet [18].

2.8.3. Reconhecimento de Padrões

Discriminação de pulsos de acordo com a fase (*phase resolved PD*) [2], a Figura 2.11 mostra alguns exemplos de padrões de DP resolvidos em uma forma estilizada, que normalmente podem ser encontrados para defeitos em sistemas de isolamento do enrolamento do estator. Nota-se que os padrões diferentes dos mostrados aqui podem também ocorrer para diferentes fontes de DP. Os usuários devem estar cientes de que vários efeitos adicionais, não mostrados aqui, podem ocorrer durante medidas DP on-line que também podem produzir outros padrões característicos DP. Especialmente forte superposição de padrões é possível em casos práticos e também variações na forma padrão, frequência DP ou outras características.

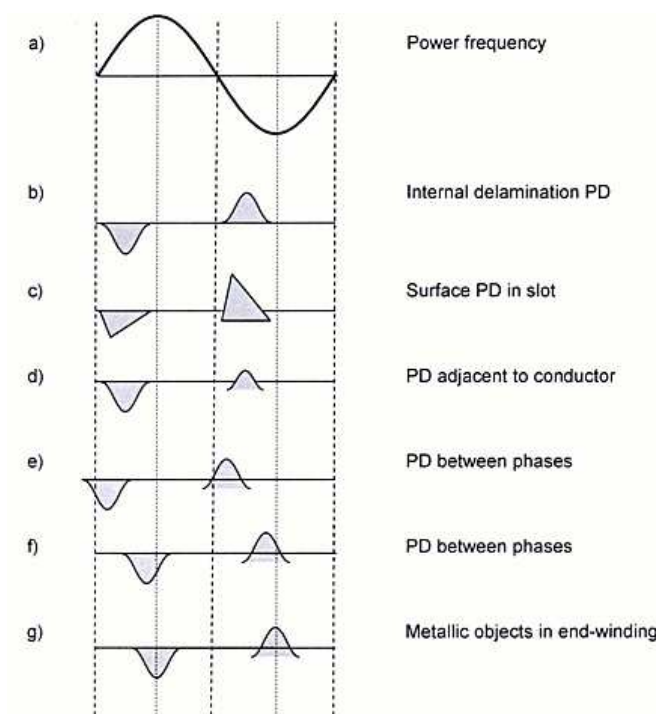
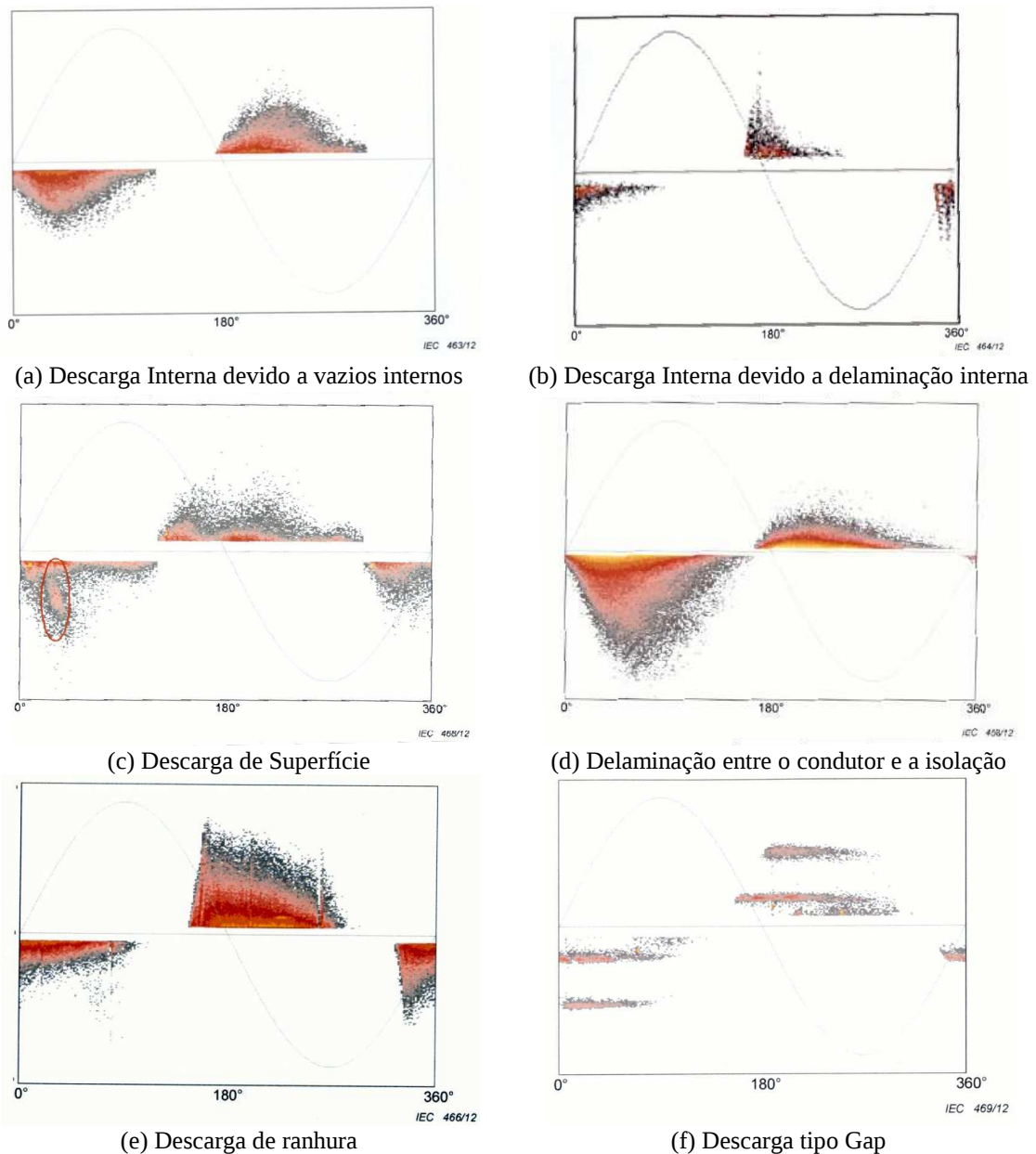


Figura 2.11 – Phase resolved PD [2]

Medições periódicas de DP foram sensíveis a algumas das fontes externas de deterioração que afetaram estes enrolamentos do estator. Verificou-se que os defeitos encontrados [36] refletem o padrão definido na norma IEC:2012 TS 60034-27-2. Importante destacar que os estatores avaliados são de diferentes fabricantes e foram instalados em datas diferentes e os acopladores utilizados são de 80 pF.

Na tabela 2.12 é possível observar os padrões típicos de descargas parciais [2].

Tabela 2.2 – Padrões típicos de descargas parciais [2].



2.8.4. Transformada Wavelet

O método mais usual no domínio *wavelet* está relacionado com a redução do ruído por limiar. Neste método, os coeficientes do sinal transformado que tem valor abaixo de um determinado valor são eliminados ou reduzidos. Os métodos de redução de ruído por limiar podem ser divididos em *Soft thresholding* ou *Hard thresholding*.

No caso do *Hard thresholding* assume-se que os coeficientes *wavelets* que são menores que o limiar, são componentes ruidosos, ficando assim o sinal bem descrito pelos coeficientes *wavelets* maiores que o limiar. Os coeficientes menores que o limiar são filtrados. No caso do *Soft thresholding* assume-se que os componentes ruidosos são distribuídos

igualmente em todos os coeficientes *wavelets*, assim todos os coeficientes *wavelets* são reduzidos pelo limiar [19].

Contudo, a transformada *wavelet* possui resolução em frequência pobre para as altas frequências. Como consequência, a estimativa da influência do ruído nestas frequências pode não ser satisfatória, em particular quando a DP possui uma relação sinal ruído baixa. Como uma alternativa, a transformada *wavelet packet* surge como uma solução e que, de acordo com a literatura tem sido utilizada com sucesso em vários problemas presente em sistemas de energia elétrica [23]-[35].

2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para análise de DP em hidrogeradores devemos considerar que os problemas existentes são:

- a) A necessidade de desenvolvimento de novas técnicas mais sensíveis na detecção de DP como a largura de banda do acoplador direcional eletromagnético [39], as antenas de radiofrequência e nanosensores [40], pois os métodos de detecção baseada em espectro de frequência abaixo de 10 MHz, em que o enrolamento do estator é um complexo sistema indutivo-capacitivo com muitas ressonâncias, não dão resultados 100% confiáveis. Sensores de banda larga têm vantagens significativas em termos de supressão de ruído;
- b) Sensores ópticos apresentam grande vantagem de instalação em relação ao sistema de medição convencional de DP (que usa um capacitor de alta tensão acoplado as barras do estator) uma vez que o sistema convencional necessita da parada do sistema para instalação, o que não ocorre com o sensor óptico uma vez que o mesmo utiliza uma tecnologia híbrida RF/óptica para captação do campo eletromagnético gerado pelas DP, porém esta tecnologia está em fase de desenvolvimento;
- c) Alto nível de ruído existente causado por fontes de centelhas e arcos voltaicos [41], etc. Soluções possíveis são a aplicação de diferentes métodos de DP: *denoising*, geralmente baseada no tempo de chegada do pulso [12] e formato do pulso, diferentes técnicas podem ser utilizadas, entre elas estão transformada *wavelet* [30], a análise estatística [3] e técnicas de aprendizagem automática, tais como: Support Vector Machine (SVM) e redes neurais;
- d) Interpretação das DP. O problema de calibração de sensores, classificação das DP, particularidades dos fabricantes, idade dos enrolamentos [36] e níveis de isolamento, nos níveis de DP;

- e) Localização das DP. O problema é complicado porque múltiplas DP, de diferentes tipos, tamanhos e localizações existem normalmente nos enrolamentos do estator. Combinações de vários sensores podem ser utilizadas para a avaliação das fontes e localização das DP.

De acordo com os sistemas de monitoramento *on-line* de DP, o mais prudente é que as análises das medições de DP devam estabelecer um comportamento estatístico do enrolamento estatórico e acompanhar a evolução e comportamento dos níveis de DP ao longo do tempo. Através da análise do histórico das descargas parciais é possível estabelecer níveis de severidade para uma unidade ou mesmo família de máquinas, permitindo um melhor diagnóstico.

3. TIPOS DE SENSORES USADOS PARA DETECÇÃO DE DP

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentadas as características gerais, vantagens e desvantagens dos sensores utilizados na medição de DP e por fim validação de um sensor eletromagnético acoplador direcional de microfita.

3.2. ACOPLADOR CAPACITIVO

A análise da atividade de DP requer a instalação permanente de dispositivos de acoplamento. De preferência, tais dispositivos de acoplamento são acopladores capacitivos. Alternativamente, bobinas de *Rogowski* ou transformadores de corrente de alta frequência são usados para capturar a atividade DP de alta frequência.

A instalação de acopladores capacitivos para monitoramento de descargas parciais exige conexões de alta tensão. Essas instalações exigem conhecimentos especiais e devem ser realizadas por profissional qualificado. Ferramentas padrão para instalações elétricas são obrigatórias, pois a conexão do acoplador deve garantir a isolação adequada do circuito, sendo essencial para o sucesso da aplicação de medições de DP, assim como a calibração do circuito, ver figura 3.1. Também é fundamental obedecer todas as normas de segurança quando se trabalha com equipamentos de alta tensão.



Figura 3.1 – Sinal aplicado de calibração [Arquivo Técnico Eletronorte, 2009].

Na maioria das vezes, um grupo de três acopladores são instalados próximo aos terminais da máquina. No entanto, cada máquina pode exigir medidas especiais e procedimentos especiais na instalação.

Normalmente a instalação é feita sob restrições de tempo e o tempo de uma máquina *off-line* é muito limitado. Assim, um planejamento cuidadoso da instalação é aconselhável. Informações sobre a máquina e as possibilidades de instalação devem ser recolhidos com antecedência, a fim de ter tudo no lugar para realizar uma instalação sem problemas e evitar qualquer atraso desnecessário.

A tensão nominal da máquina determina o tipo de capacitor de acoplamento a ser utilizado. Na UHCN (tensão nominal fase-neutro 7,6 KV), foi utilizado o acoplador modelo CC14B [6] que suporta uma tensão nominal de até 14kV. Ao trabalhar em instalações de alta tensão vários padrões e guias devem ser obedecidos sobre as distâncias mínimas e distância de fuga, por exemplo. É estritamente necessário verificar se as normas podem ser satisfeitas para o ponto de instalação desejado.

A preparação e instalação dos acopladores segue o procedimento abaixo:

- a) Escolha do acoplador (V_n , capacitância e distância de isolamento);
- b) Determinação das distâncias mínimas e requisitos de espaço;
- c) A escolha do método de montagem;
- d) Determinação do comprimento do cabo e conexões necessários para instalação;
- e) Preparação do material de instalação (miscelânea de materiais: parafusos, cabos de alta tensão, suportes, etc...);
- f) Local de instalação;
- g) Verificação da instalação;
- h) A calibração dos acopladores.

Diferentes modos de instalação dos acopladores dependem principalmente do projeto e tamanho da máquina e a sua ligação à rede elétrica. Em geral, a instalação dos acopladores segue o esquema da figura 3.2. Um capacitor de acoplamento está conectado a cada barra de fase o mais próximo possível do terminal de saída da máquina. Cada acoplador tem uma conexão à alta tensão e uma ligação à terra. De cada acoplador, um cabo BNC conecta o acoplador a uma caixa terminal onde está a impedância de acoplamento, figura 3.3. Esta caixa de terminação fornece a proteção terra para o cabo de sinal e também está ligada ao potencial terra de proteção.

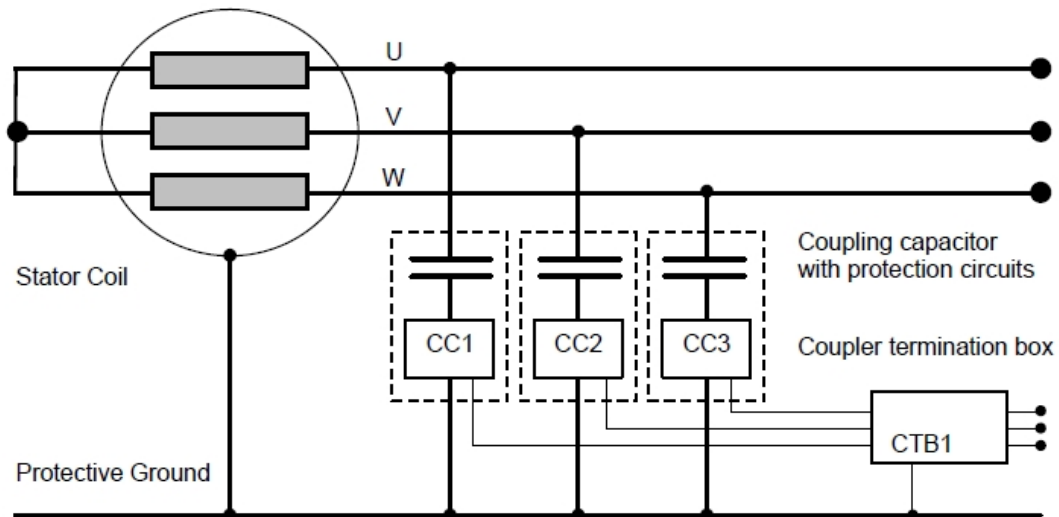


Figura 3.2 – Esquema geral de instalação para máquinas rotativas [44].

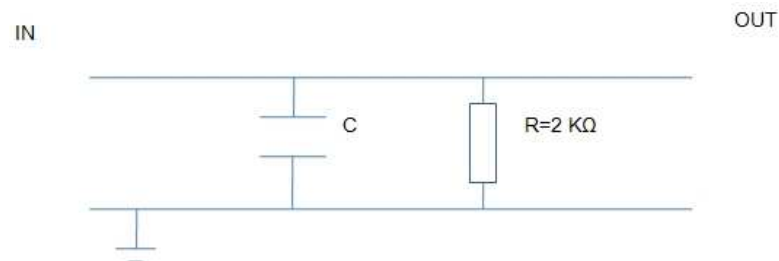


Figura 3.3 – Impedância de acoplamento.

Os grandes motores são alimentados com cabos de média tensão. Esses cabos têm uma impedância muito baixa em altas frequências, o que reduz a amplitude das altas frequências do sinal de descarga parcial. Assim, o acoplador deverá ser montado de um modo geral o mais próximo possível do terminal de máquina. A alta tensão, bem como a ligação à terra do acoplador deve ser ligada mais próximo da máquina e distante do cabo, se possível. A instalação dos acopladores capacitivos exigem as seguintes conexões, ver figura 3.4:

- Ligação de alta tensão entre o barramento de fase e terminal de alta tensão do acoplador;
- Ligação de terra entre a caixa de alumínio do acoplador e o terra;
- Ligação entre cada acoplador e impedância de acoplamento;
- Ligação da caixa da impedância de acoplamento e o terra.

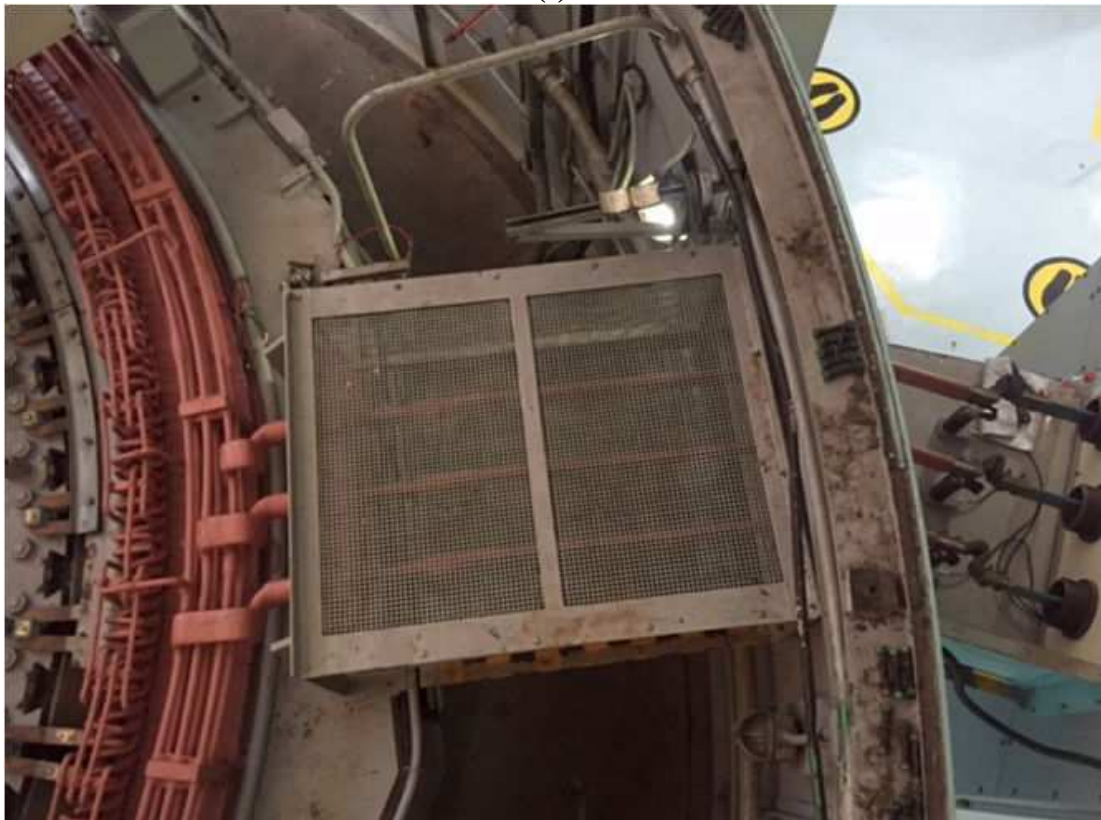
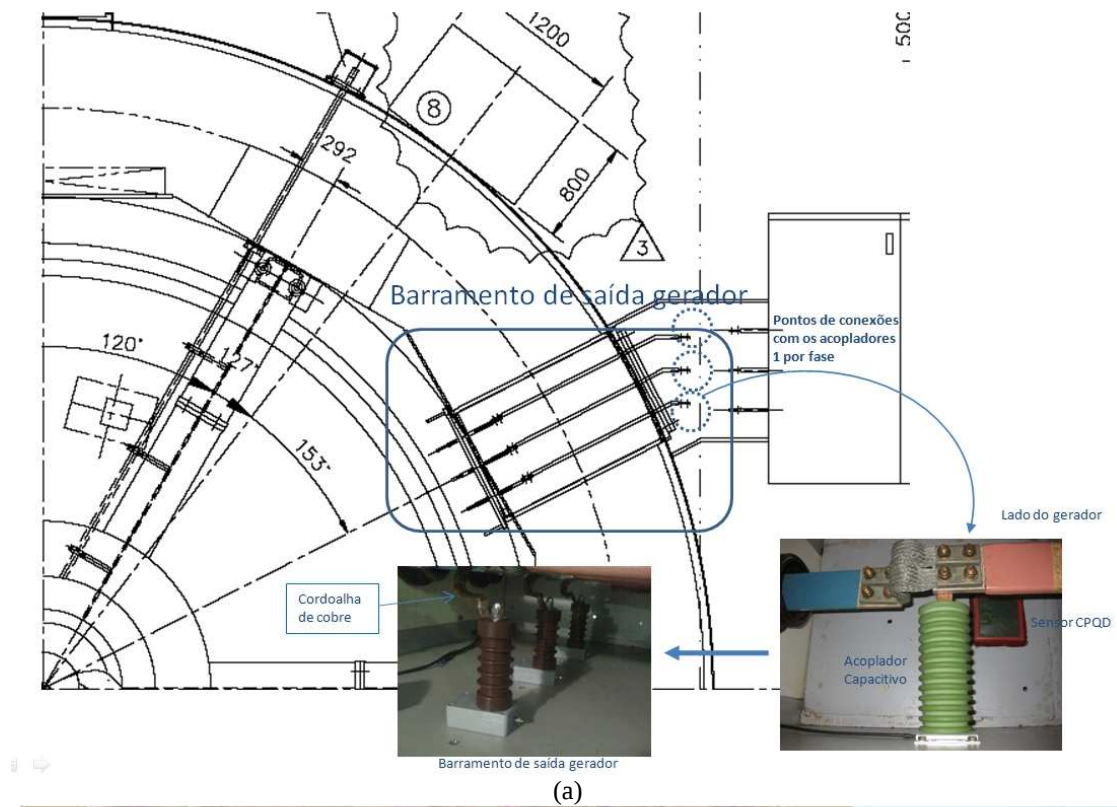


Figura 3.4 – (a) Instalação do acoplador na UHCN, CNUGH-03, no barramento de saída do gerador (b) vista superior do estator, barramento de saída e acopladores capacitivos.

Dependendo da tensão nominal e o espaço disponível no interior da caixa do terminal de um grande motor, tal instalação pode ainda ser possível dentro da caixa de terminais. No

entanto, é obrigatório obedecer a distância fase-fase mínima e distâncias fase-terra, bem como a distância de isolamento. Para a conexão padrão, o acoplador é aparafusado usando os furos de montagem da caixa de alumínio do acoplador, figura 3.5.

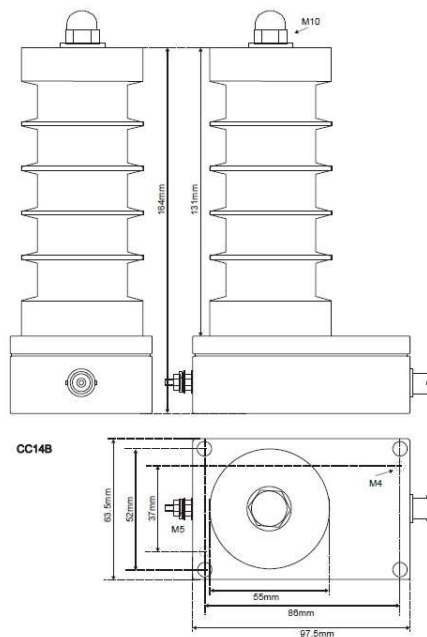


Figura 3.5 – Desenho do acoplador capacitivo [44].

Especialmente para a ligação de alta tensão, é importante escolher o cabo suficientemente longo para permitir um ligeiro movimento devido às vibrações, evitando flexão acentuada. No entanto, os cabos longos desnecessários devem ser evitados. Além disso, é importante não permitir qualquer escoriação do isolamento do cabo de alta tensão.

Em geral, é necessária uma conexão com a terra para cada acoplador capacitivo. A figura 3.6 mostra uma ligação à terra, pois os acopladores devem ser protegidos contra vibrações como qualquer outra ligação.

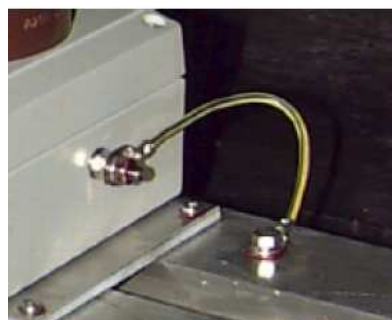


Figura 3.6 – Conexão com o terra [44].

Acopladores capacitivos encontrados no mercado estão na faixa de 80 -1000 pF, ver figura 3.7. O capacitor é uma impedância muito alta para a tensão AC, mas muito baixa para os pulsos correntes DP de alta frequência. A saída do capacitor de alta tensão é conectada a uma carga resistiva ou indutiva capacitiva chamada de impedância de medição ou detector.

Embora existam muitos tipos de sensores de DP disponíveis, capacitores de alta tensão são os sensores mais utilizados para testes de diagnóstico.

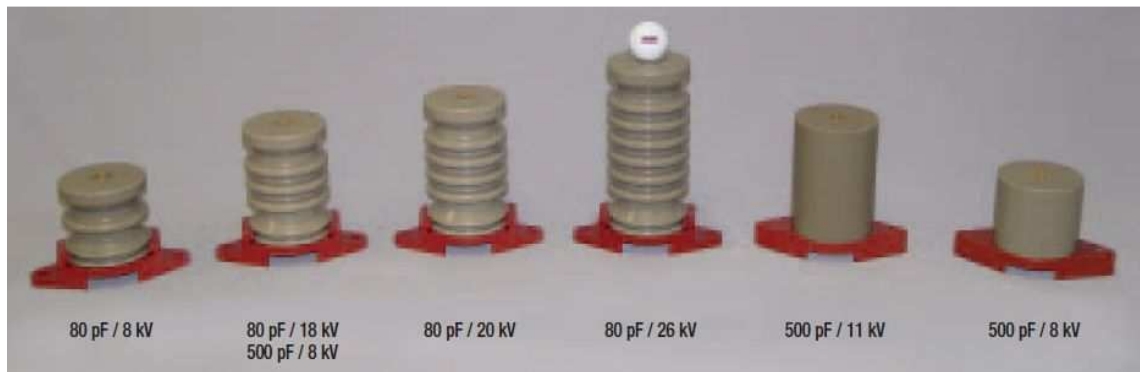
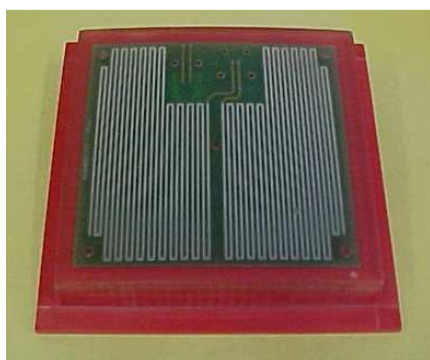


Figura 3.7 – Acoplador capacitivo [7]

3.3. SENSORES ÓPTICOS

Os sensores ópticos são encapsulados em resina de poliéster devido às suas boas propriedades mecânicas, tais como: tração, flexão e impacto, além de não ser condutor de corrente elétrica, possuir estabilidade dimensional, baixa absorção de água, resistência à corrosão e oxidação, ótimo acabamento superficial, baixa condutibilidade térmica (0.22 W/mK), temperatura máxima de operação alta (160 °C), além de possuir baixo custo. No encapsulamento se encontram alojadas tanto as antenas meander, feita em circuito impresso, como os componentes eletrônicos e opto-eletrônicos [37]. As dimensões da parte do encapsulamento do sensor são de 120 x 120 mm, ver figura 3.8.



(a)



(b)

Figura 3.8 – Encapsulamento do sensor (a) visto pela frente (antena) e (b) por cima mostrando as conexões ópticas [37].

3.4. SENSOR ACOPLADOR DIRECIONAL DE MICROFITA

Para medir DP com o método elétrico, são comumente usados sensores denominados acopladores capacitivos, que são instalados ao longo dos enrolamentos do estator, em que é necessária uma conexão direta ao enrolamento, o que demanda mão-de-obra especializada

para refazer a isolação no local e garantir que esta não seja comprometida. No intuito de se eliminar tal dificuldade, dentre outras vantagens, um sensor acoplador direcional de microfita foi aprimorado e validado neste trabalho, ver figura 3.9.

Ao contrário dos acopladores capacitivos que são capacitores de alta tensão, o sensor direcional de microfita não está ligado diretamente ao enrolamento.



Figura 3.9 – (a) Sensor encapsulado em silicone, (b) Sensor sem encapsulamento.

O sensor acoplador direcional de microfita [38] é constituído por uma linha de transmissão confeccionada em uma placa de circuito impresso flexível, constando de um substrato dielétrico, plano de terra, linha de microfita e encapsulada em borracha de silicone, ver figuras 3.9 e 3.10. Um cabo coaxial de 50 ohm e 4 metros transmite o sinal detectado no sensor até o sistema de medição instalado fora do sistema de refrigeração do estator. As dimensões dos sensores encapsulados em silicone são de 1,0 x 2,0 x 40 cm [38]. A seguir são apresentados os resultados comparativos dos dois sensores confeccionados, ver tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Característica da resistividade superficial de isolamento do acoplador direcional de microfita.

Identificação da amostra	Face	Medições de Resistência Superficial de Isolamento (TΩ)			Média (TΩ)
Sensor 1	A	1,511	1,250	1,210	1,324
	B	1,519	1,032	0,9669	1,173
Sensor 2	A	0,5562	1,379	1,213	1,049
	B	1,197	1,026	0,9097	1,044
Temp. amb. 23 °C e U.R.Ar 50 %			Média Geral (R _s)		1,15
Resistividade superficial de isolamento ρ _s (TΩ)					0,436

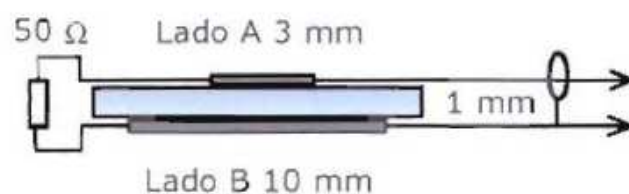


Figura 3.10 – Esquema elétrico do sensor acoplador direcional de microfita.

3.5. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DOS SENSORES

A seguir serão apresentados resultados da avaliação de sensibilidade, através da aplicação de um sinal conhecido, calibração e ensaios com alta tensão, para quatro acopladores capacitivos e dois sistemas experimentais, um sensor acoplador direcional de microfita e um cabo coaxial RG 58, desencapado, utilizado com a função de antena [99, 100].

3.5.1. Aplicação de um Sinal Conhecido de Calibração

Nesta etapa do estudo, sinais conhecidos de calibração foram injetados na barra e medidos através de capacitores de acoplamento ligados ao terminal barra e em série com a impedância de medição. Foram utilizados quatro modelos comerciais de 80, 220, 500 e 1000 pF. A figura 3.11, a seguir, ilustra os acopladores utilizados neste estudo.



Figura 3.11 – (a) Acopladores utilizados no estudo; (b) Utilização do acoplador de 500 pF.

Com relação às respostas para os quatro acopladores capacitivos utilizados, pode-se observar que quanto maior a capacitância maior é amplitude do sinal registrado, em relação aos espectros de frequência nota-se que a maior densidade dos sinais medidos pelos acopladores de 220, 500 e 1000 pF se concentra na faixa de 0 a 15 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 20 a 50 MHz, já para o acoplador de 80 pF a maior densidade dos sinais medidos encontra-se na faixa de 25 a 35 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 5 a 15 MHz e 35 e 50 MHz.

Dando sequência à avaliação da sensibilidade dos sensores foi analisada a eficiência de dois sistemas experimentais, um sensor direcional de microfita e um cabo coaxial RG 58, desencapado, utilizado com a função de antena.

Um sensor acoplador direcional de microfita desenvolvido em um projeto de pesquisa pela Universidade Federal do Pará, foi analisado para verificar sua aplicabilidade para captação dos sinais de DP, a figura 3.12, ilustra o sensor utilizado nos testes laboratoriais.



(a) (b)
Figura 3.12 – (a) Sensor utilizado; (b) Sensor instalado na barra.

A metodologia utilizada para avaliação do sensor foi experimental, pois consiste em colocá-lo em diferentes posições na barra e em seguida aplicar um sinal conhecido de calibração em uma das extremidades da barra e registrar o sinal captado com o sensor.

Os testes laboratoriais mostraram uma redução de intensidade da amplitude do sinal registrado à medida que o sensor se distanciava da fonte do sinal de calibração.

Nesta última situação um cabo coaxial, do tipo RG 58, foi utilizado com a função de uma antena para captar os sinais de DP. Para utilização do cabo como antena foi removido 26 cm (mesmo tamanho do sensor acoplador direcional de microfita, cujos resultados foram apresentados anteriormente) da capa flexível de proteção e da blindagem, deixando apenas o dielétrico exposto, conforme ilustrado na figura 3.13.



(a) (b)
Figura 3.13 – (a) Cabo coaxial utilizado no estudo; (b) Utilização do cabo coaxial como antena.

A metodologia utilizada para avaliação do cabo coaxial que funciona como antena consistiu em acoplá-lo a barra, em seguida aplicar um sinal de calibração conhecido em uma das extremidades da barra e registrar os sinais de DP para diferentes comprimentos, iniciou-se as medições com os 26 cm e foi-se diminuindo o comprimento do cabo, de 4 em 4 cm até zerar. Os resultados para 26 cm apresentam maior amplitude do sinal registrado (~ 650 mV) e a amplitude do sinal medido decresce com o seu comprimento. Os espectros de frequência mostram que a maior densidade dos sinais medidos pelo cabo coaxial se concentra na faixa de 40 a 55 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 10 a 20 MHz.

A seguir é feita uma comparação para esta etapa do estudo, a verificação da sensibilidade dos sensores através da aplicação de um sinal conhecido de calibração. A figura 3.14 ilustra essa comparação, nota-se que para a aplicação de um sinal de calibração os acopladores capacitivos apresentaram maior sensibilidade em relação ao sensor e o cabo coaxial.

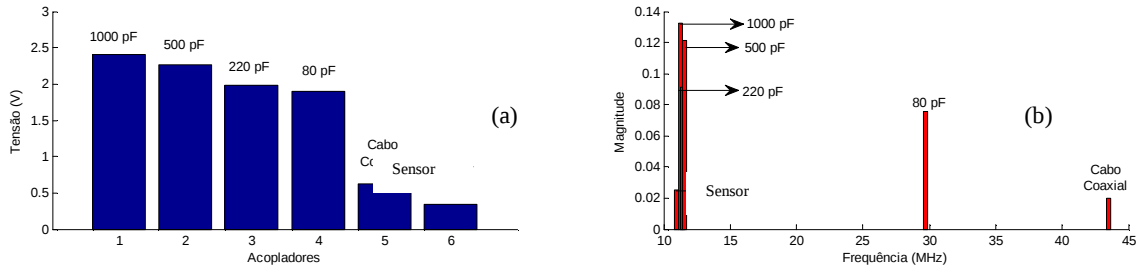


Figura 3.14 – Comparação entre os diferentes sensores durante os ensaios de calibração. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima dos sinais pela frequência.

3.5.2. Ensaios com Alta Tensão

Os ensaios com alta tensão foram realizados utilizando a metodologia proposta por [48], o ensaio da barra foi iniciado com um condicionamento de tensão em U_n (tensão alternada nominal da barra) durante cinco minutos. Após isso, a tensão foi elevada a partir de zero até $U_n/\sqrt{3}$ em que efetuou-se a primeira medição do padrão de descargas parciais em um intervalo de aquisição de 60s. Após a obtenção dos dados da primeira medição, a tensão foi elevada até o próximo patamar de tensão (U_n) em que a segunda medição foi realizada. A figura 3.15 ilustra as rampas de tensão usadas nas medições, incluindo a etapa de condicionamento.

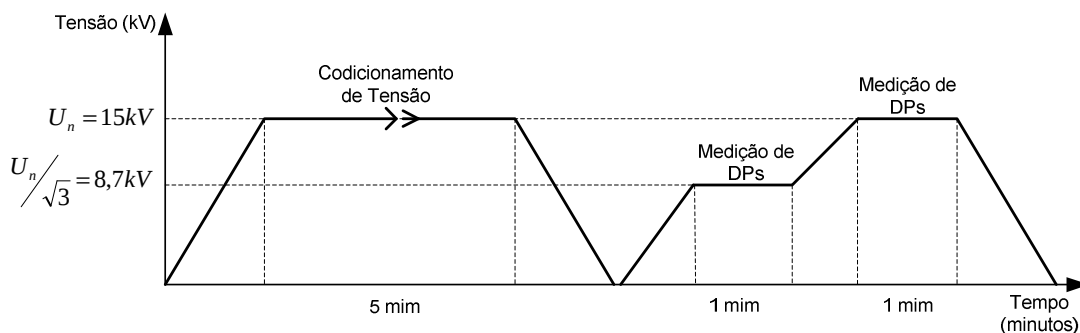


Figura 3.15 – Procedimento de ensaio utilizado durante as medições de DP [48].

Os acopladores testados nesta fase do estudo foram os capacitores de 80 e 220 pF e o sensor acoplador direcional de microfita desenvolvido pela UFPA, os outros dois capacitores (500 e 1000 pF) e o cabo coaxial não puderam ser testados nesta etapa, pois a impedância de

medição utilizadas nos ensaios com alta tensão para medição de DP não era apropriada para a tensão de saída dos acopladores.

No primeiro momento foram testados os capacitores de acoplamento e durante a execução dos ensaios observou-se o surgimento dos primeiros inícios DP a partir de 10 kV. As figuras 3.16 e 3.17 apresentam os resultados obtidos para os capacitores de acoplamento de 80 e 220 pF em 15 kV, respectivamente. Observa-se nas figuras que o capacitor de 80 pF mediu um sinal mais atenuado em relação ao capacitor de 220 pF. Em relação aos espectros de frequência nota-se que a maior densidade dos sinais medidos pelos dois acopladores se concentram na faixa de 0 a 10 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 30 a 40 MHz. Os mapas estatísticos medidos pelos dois acopladores mostraram uma simetria das descargas positivas (que ocorrem no semi ciclo negativo) e as descargas negativas (que ocorrem no semi ciclo positivo), este padrão é caracterizado como descargas internas, [2].

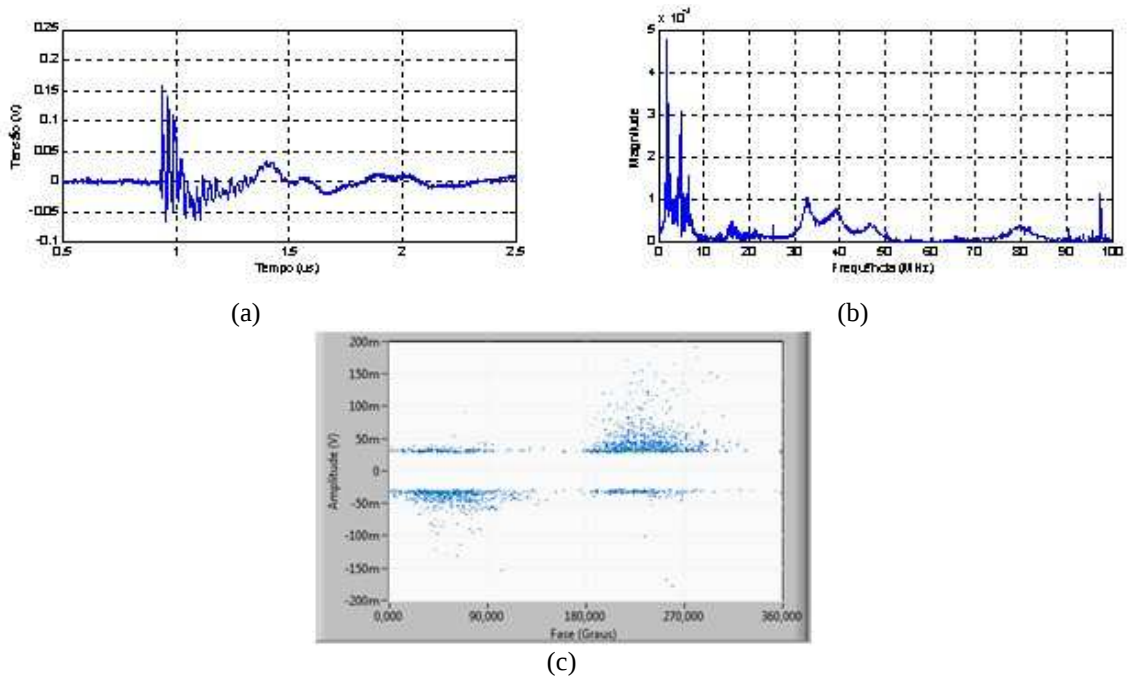


Figura 3.16 – Padrão de DP, medido a 15 kV pelo acoplador de 80 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.

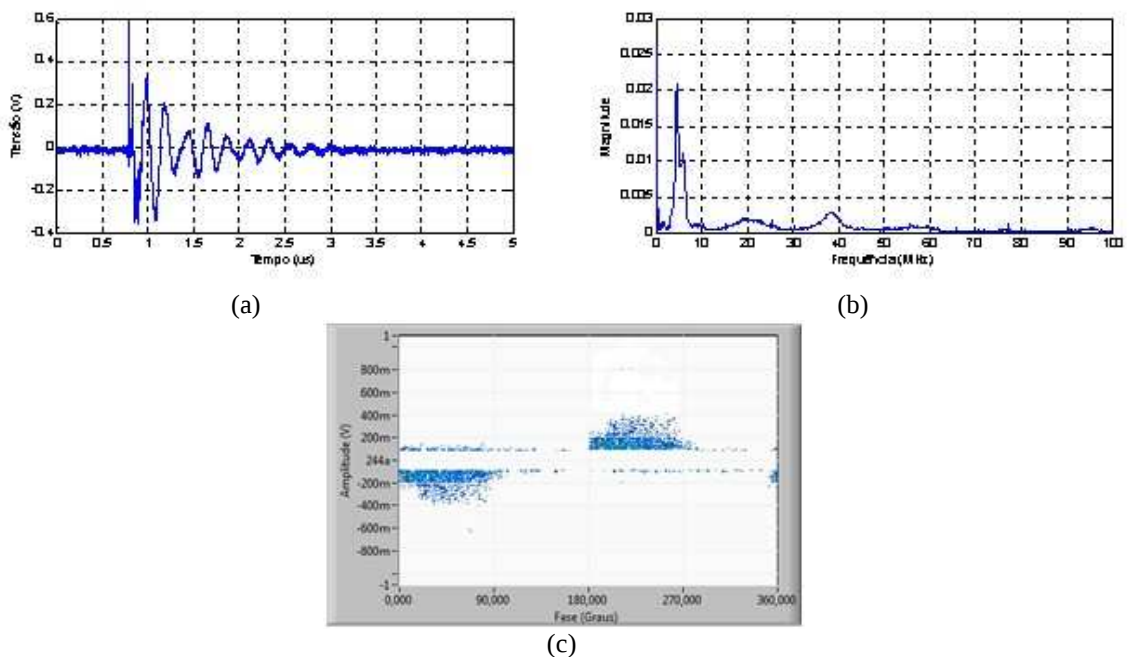


Figura 3.17 – Padrão de DP, medido a 15 kV pelo acoplador de 220 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.

A segunda fase dos ensaios com alta tensão foi o teste com o sensor acoplador direcional de microfita, no primeiro momento o sensor foi acoplado à camada condutiva da barra, conforme figura 3.18 (a), porém para testar as propriedades dielétricas do material isolante utilizado o sensor foi reposicionado para a posição da barra onde o campo elétrico é mais intenso, conforme a figura 3.18 (b). Os resultados são apresentados na figura 3.19. Observa-se que o sensor mediu um sinal com maior amplitude em relação aos dois

acopladores. Em relação ao espectro de frequência nota-se que novamente a maior densidade dos sinais medidos se concentra na faixa de 0 a 10 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 10 e 30 MHz. O mapa estatístico medido pelo sensor apresentou a mesma simetria, entre as descargas positivas e negativas, identificada no mapa dos acopladores.

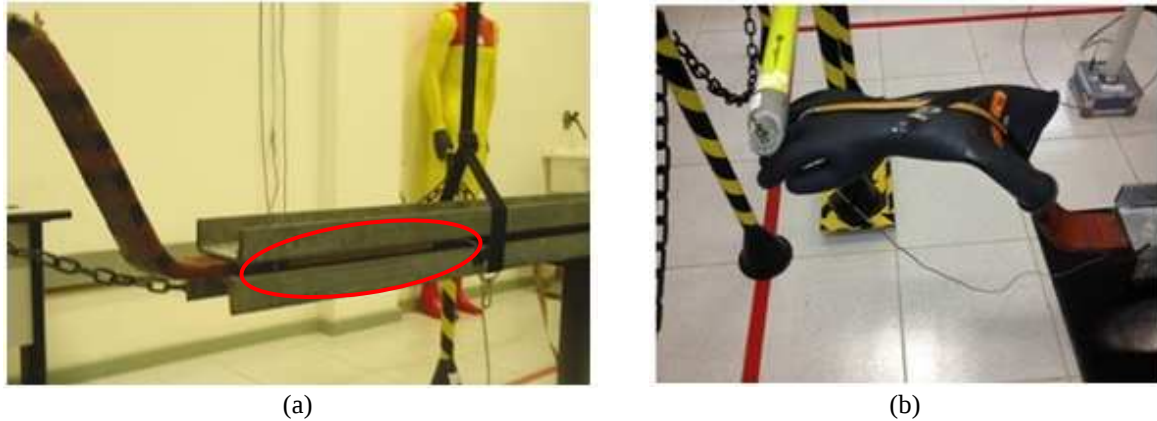


Figura 3.18 – Sensor instalado na barra para os ensaios com alta tensão. (a) Instalada na ranhura; (b) Instalada na extremidade da barra, região com maior intensidade campo elétrico.

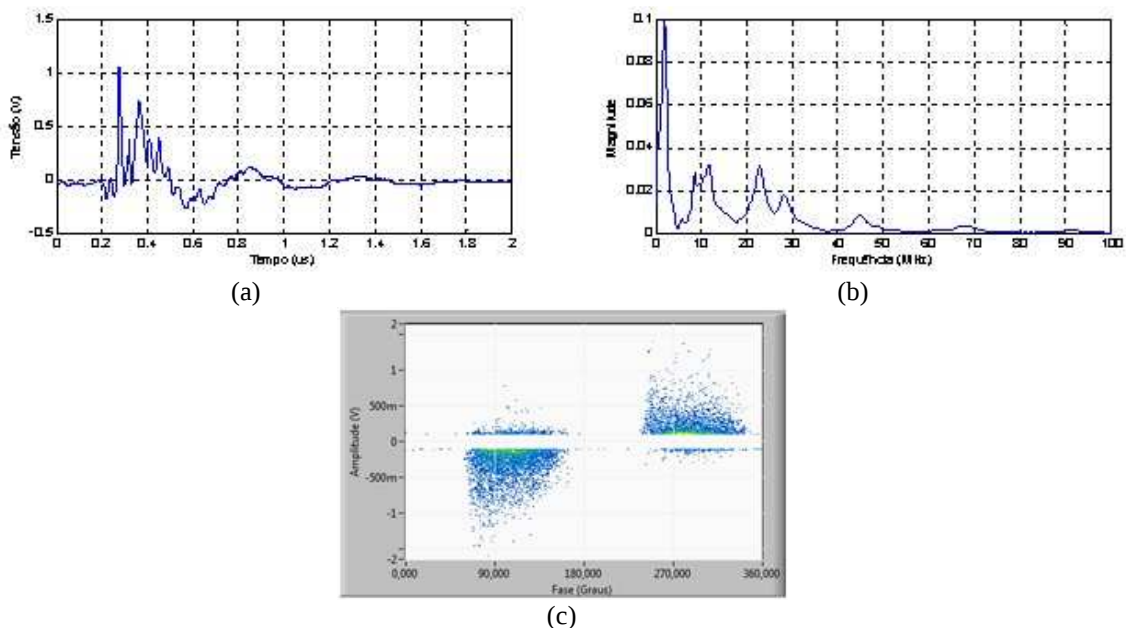


Figura 3.19 – Padrão de DP, medido a 15 kV pelo sensor. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.

Uma comparação é realizada, a seguir, entre os ensaios com alta tensão para medição de descargas parciais utilizando os acopladores capacitivos e o sensor acoplador direcional de microfita através da Tabela 3.2 e a figura 3.20, nelas pode-se observar que a sensibilidade do sensor, durante os ensaios com alta tensão, é maior que a do método convencional de medição de DP em hidrogeradores utilizando os acopladores capacitivos de 80 e 220 pF.

Os resultados obtidos em laboratório mostraram que a medição de descargas parciais através do sensor pode ser realizada de forma satisfatória na avaliação da condição

operacional dos enrolamentos do estator de hidrogeradores, sem perda significativa de informação ou sensibilidade na quantificação do fenômeno.

Tabela 3.2 – Características das medições de descargas parciais.

Acoplador	Amplitude Média das Descargas (mV)		Número de Pulsos	
	Positiva	Negativa	Positivos	Negativos
Sensor acoplador direcional de microfita	231,38	280,24	3645	5590
Capacitor de Acoplamento de 220 pF	151,76	140,88	2475	2103
Capacitor de Acoplamento de 80 pF	43,14	36,08	1584	1099

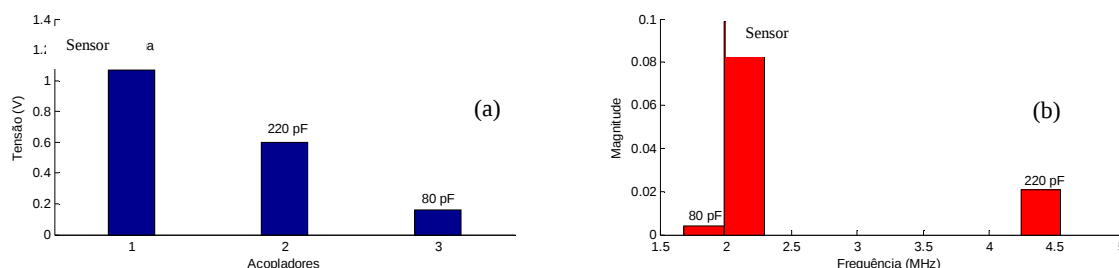


Figura 3.20 – Comparação entre os diferentes sistemas de medição durante os ensaios com alta tensão. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima dos sinais pela frequência.

3.5.3. Ensaios com Alta Tensão - Simulação de Defeitos em Laboratório

Para comprovar a eficiência do acoplador direcional de microfita foram simulados dois tipos de defeitos/falhas em laboratório: descargas de superfície e descarga tipo gap. Também utilizou-se um sistema de aquisição de DP comercial, denominado MPD 600 de fabricação Omicron. Os ensaios comprovaram que o acoplador direcional de microfita é compatível com qualquer sistema de *hardware* de medição de DP.

Uma barra Roebel foi utilizada para a simulação de descargas de superfície, este tipo de defeito ocorre ao longo dos terminais de saída do enrolamento devido a contaminação na interface ar-isolação. Esta atividade, simulada em laboratório, é apresentada na figura 3.21 (a), em que foi utilizado um arame para simular a contaminação na superfície.

Um típico padrão PRPD de descargas de superfície é apresentado na figura 3.21 (b), onde as descargas estão destacadas pelas elipses vermelhas. A principal característica deste defeito é uma nuvem vertical de DP combinada com um baixo número de ocorrência e podem ocorrer em ambas as polaridades de acordo com a norma IEC 60034-27-2-2012.

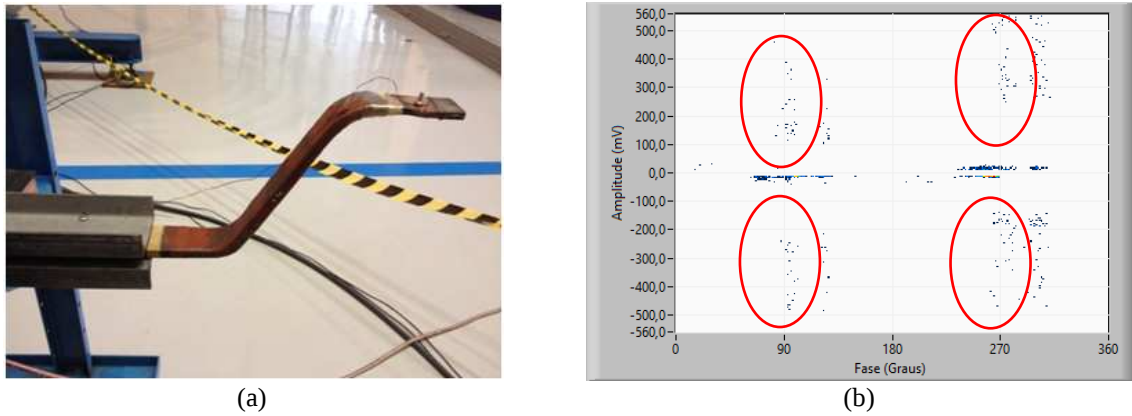


Figura 3.21 – (a) Simulação em laboratório de descargas de superfície, (b) Padrão PRPD de descargas de superfície medido em laboratório.

Na Figura 3.22, pode-se observar um padrão característico de descargas tipo Gap, destacado pela elipse vermelha, Figura 3.22 (b), a principal característica das dessas descargas é uma nuvem horizontal de DP de amplitude relativamente constante, presente em ambas as polaridades da tensão aplicada conforme norma IEC 60034-27-2.

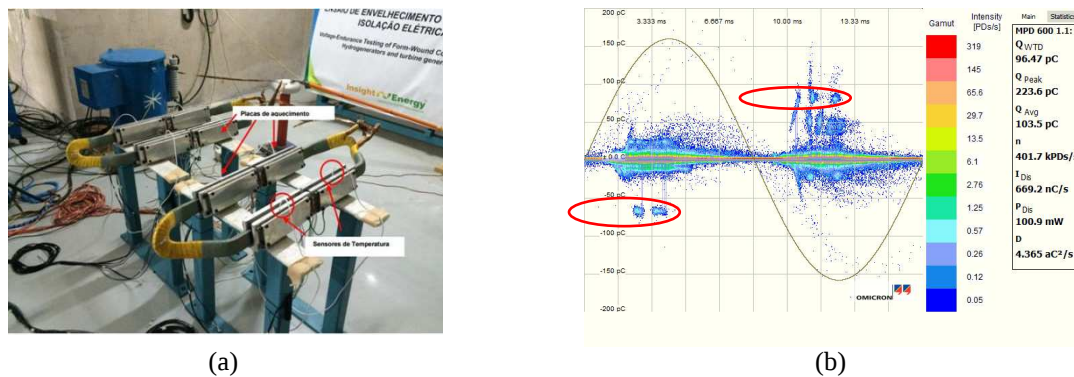


Figura 3.22 – (a) Bobina durante o ensaio de envelhecimento acelerado, (b) Padrão PRPD de descargas tipo *gap* medido em laboratório.

Observa-se que os mapas PRPD medidos pelo acoplador direcional de microfita tanto para descargas de superfície quanto para descargas tipo *gap* apresentaram os mapas esperados em consonância com a norma.

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os tipos de sensores utilizados para medição de DP e as vantagens e desvantagens na montagem e utilização destes para este fim. Também foi validado experimentalmente o sensor acoplador direcional de microfita. Detalhes da análise numérica do acoplador direcional de microfita podem ser verificados no apêndice A.

4. MÉTODOS TEÓRICOS PARA ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE DP NO ESTATOR

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O ponto de partida para a modelagem da barra foi a obtenção dos arquivos de projeto do estator da máquina, disponibilizados pelo fabricante Voith Siemens. Dispondo desses arquivos, ver figura 4.1, utilizou-se o software SOLIDWORKS compatível com as extensões: .ASM, .PAR, .CFG. e a partir dele, iniciou-se o processo de modelagem da barra.

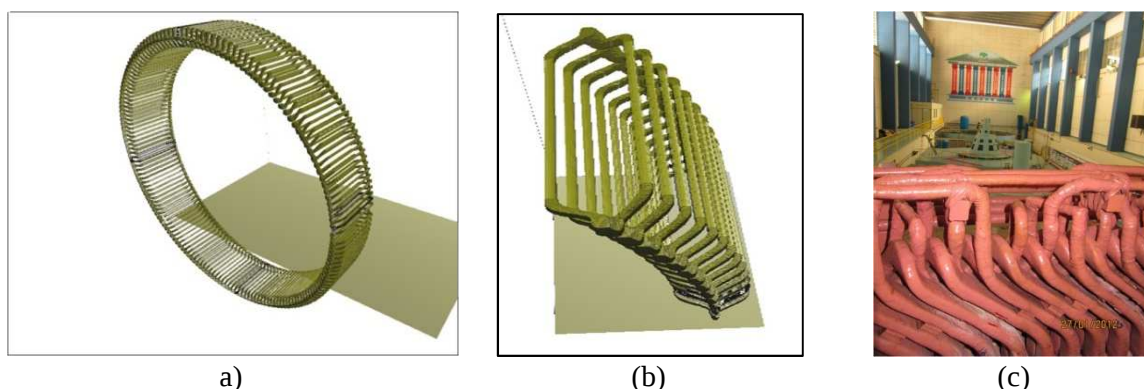


Figura 4.1 – (a) Vista 3D do enrolamento do estator da máquina, (b) vista 3D de parte do estator e (c) detalhes de parte do estator.

Com o modelo concebido para ser simulado com o método FDTD-3D (diferenças finitas no domínio do tempo), foram simuladas descargas parciais em diversos pontos da barra e um método de localização foi desenvolvido.

4.1.1. Modelagem da Barra

O projeto do enrolamento de um gerador síncrono de 48 pólos salientes foi fornecido à Eletronorte pelo fabricante. A máquina é acionada por turbina Kaplan e tem as seguintes especificações nominais: potência de 30402 kVA, tensão de 13200 V, faixa de operação $\pm 5\%$, corrente de 1330 A, frequência de 60 Hz e fator de potência de 0,95. A partir dos arquivos de projeto do equipamento (em SolidWorks) [81], foi possível obter-se um modelo computacional preciso de uma bobina do estator, o qual é mostrado na figura 4.1. Foi desenvolvida uma rotina computacional específica para realizar a exportação destes dados geométricos para o simulador FDTD [82], chamado SAGS.

O primeiro passo foi obter somente uma das fases da barra a partir dos arquivos fornecidos pelo fabricante. Isto foi feito a partir do programa SOLIDWORKS. As figuras 4.2 e 4.3 mostram uma das fases da barra. A barra possui 15,74 metros de comprimento.



Figura 4.2 – Vista 3D de uma das fases da barra (modelo geométrico 3D ainda em SOLIDWORKS).



Figura 4.3 – Vista superior de uma das fases da barra (SOLIDWORKS).

Após isso, foi necessário fazer a discretização deste modelo para realizar a exportação para o *software* SAGS, no qual foram realizadas as simulações. O *software* utilizado para realizar esta discretização foi o *Blender*. Primeiramente, usando o *SOLIDWORKS*, gerou-se um arquivo com a extensão .STL, extensão que é compatível com o *Blender*. A figura 4.4 mostra o modelo da barra já renderizada. Ressalta-se que o *Blender* é um *software* livre (não comercial), disponível para livre *download*.

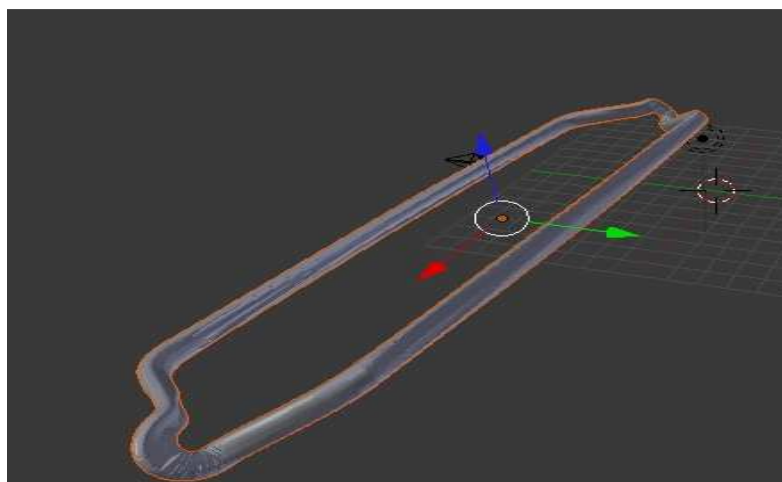


Figura 4.4 – Barra renderizada no *software* Blender.

Após a discretização, exportou-se o arquivo para o formato .txt utilizando o *software* 3D Object Converter. O passo seguinte foi converter esse arquivo para um formato

compatível com o SAGS. Dessa forma, foi implementada uma rotina em C para realizar tal conversão. Ressalta-se que algumas partes da estrutura foram modeladas manualmente, dada a complexidade geométrica destas.

O modelo no SAGS é composto de três partes, a primeira é a parte metálica interna, a segunda é a camada dielétrica e a terceira é a parte metálica externa. A figura 4.5 ilustra estas partes. Vale ressaltar que o material de que é composto o dielétrico é a mica, e possui os seguintes parâmetros: $\epsilon_r = 7$, $\sigma = 21mS/m$ e $\mu_r = 1$ [87].

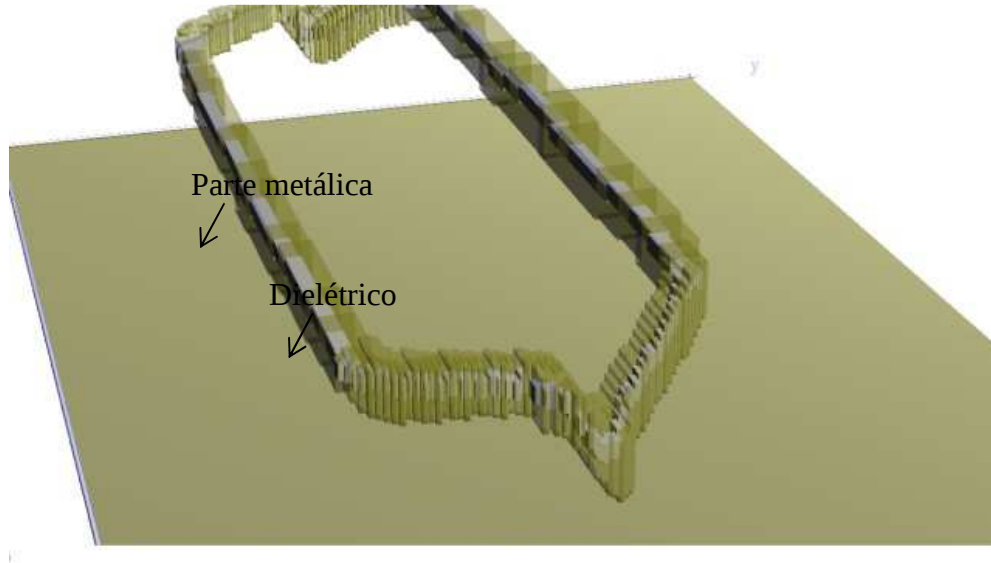


Figura 4.5 – Composição interna do modelo da barra concebido no software SAGS.

4.1.2. Validação do Software SAGS para Análise de Propagação de Descargas Parciais em Barras Estatóricas.

Para fins de validação do *software* SAGS [82], adaptado para modelarem-se descargas parciais [96], reproduziram-se os resultados do problema proposto em [83]. No artigo citado, é feito um estudo da propagação de pulsos de descargas parciais ao longo de barras estáticas. O circuito usado é mostrado na figura 4.6 [83].

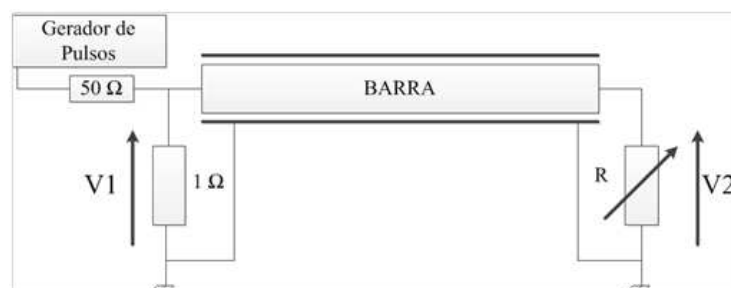


Figura 4.6 – Esquemático do experimento realizado em [83].

A barra possui 3,8 m de comprimento. A resistência R , indicada na figura 4.6, é de 8,5 Ω . As tensões $V1$ e $V2$ são mostradas na figura 4.7.

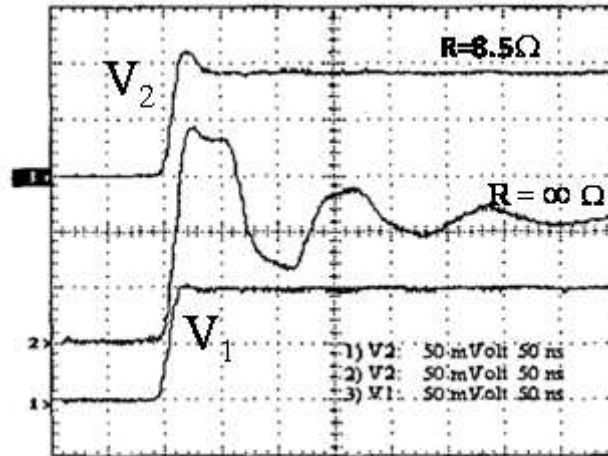


Figura 4.7 – Tensões transitórias V1 e V2, medidas em [83].

O *setup* experimental foi modelado no simulador SAGS [82]. O modelo FDTD é composto de três camadas: estrutura interna de metal, que é cercada por uma camada dielétrica, que por sua vez é revestida por uma camada metálica (externa), como é ilustrado na figura 4.8. A camada dielétrica é caracterizada pelos seguintes parâmetros $\epsilon_r = 3,8$, $\sigma = 0,00010394 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$. As partes de metal são consideradas como cobre ($\epsilon_r = 1$, $\sigma = 10270 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$). Ressalta-se que estes parâmetros foram inferidos a partir de resultados apresentados em [83] e de medidas realizadas em uma barra semelhante fornecida pela Eletronorte.

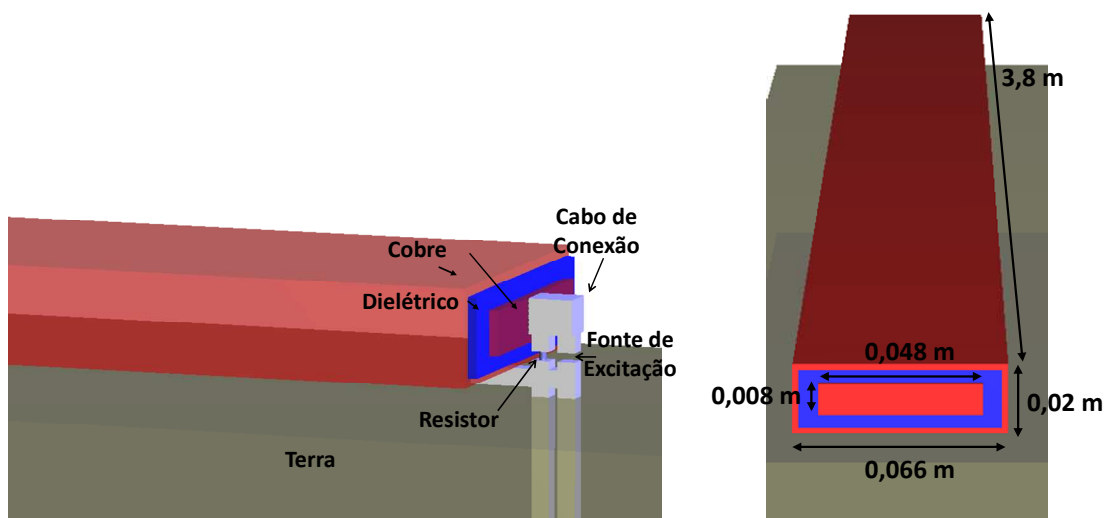


Figura 4.8 – Representação do modelo FDTD da barra mostrado no SAGS: dimensões e representação 3D de vários meios.

O grid computacional criado para representar o espaço consiste de $848 \times 254 \times 165$ células cúbicas de Yee, com aresta $\Delta = 2 \text{ mm}$. Algumas aproximações foram feitas no modelo numérico da estrutura, uma vez que todos os dados geométricos não foram especificados em [83]. Verificou-se que o diâmetro dos cabos de conexão contribui significativamente para a

tensão de saída V2. Cabos com diâmetro menor que 8 mm causam oscilações indesejadas no resultado. Uma comparação entre as formas de onda da tensão V2, obtida pela simulação FDTD e pelo experimento feito em [83] é mostrada na figura 4.9.

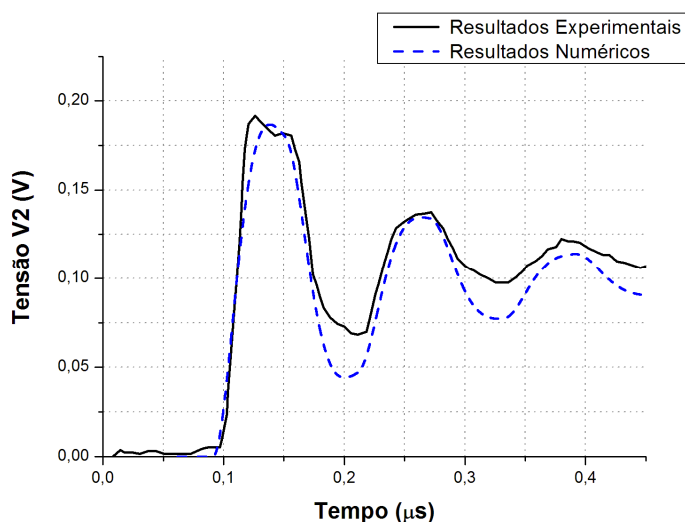


Figura 4.9 – Comparação entre formas de ondas numérica (deste trabalho) e experimental [83] para a tensão V2

Observa-se que a tensão simulada não é idêntica a tensão experimental. Isto ocorre porque não são definidos em [83] as dimensões exatas de largura e espessura da barra experimental. A simulação numérica foi realizada utilizando-se as dimensões da barra disponibilizada pela Eletronorte. No entanto, verifica-se que elas apresentam fases e amplitudes semelhantes entre si. Isto valida o *software* desenvolvido e o método utilizado para simular presente problema.

4.1.3. Montagem do Experimento

Foram realizados experimentos práticos no Centro Tecnológico da Eletronorte – Miramar, relativos à injeção de pulsos em barra de hidrogerador. Nestes experimentos utilizou-se uma barra da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. A barra possui as seguintes dimensões (aproximadamente): 2,92 m × 18 mm × 64,3 mm e é composta por três partes: o condutor interno de cobre, a região dielétrica (mica) e uma tinta semicondutiva externa. A figura 4.10 mostra a barra utilizada no experimento, as barras de aço (que caracterizam a ranhura) e o devido aterramento do circuito.



Figura 4.10 – Barra, ranhura e acesso ao local de aterramento do experimento.

Os equipamentos utilizados para a realização do experimento foram:

- Um Osciloscópio Tektronix TDS 3034B com taxa de amostragem de 2,5 GS/s;
- Um gerador de função Tektronix TM503A PG507;
- Duas décadas resistivas;
- Cabos curtos (coaxiais);
- Conectores do tipo “jacaré” e “banana”;
- Uma parte de uma bobina estatórica (barra);
- Barras de aço para caracterizar da ranhura.

A figura 4.11 ilustra os equipamentos utilizados na realização do experimento.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.11 – (a) Gerador de função; (b) Osciloscópio; (c) Década resistiva.

No experimento, foi realizado um arranjo equivalente ao proposto em [83] (ver figura 4.6). Conectou-se o gerador de pulsos a uma das extremidades da bobina, diretamente nos condutores internos, tal como indicado nas figuras 4.6 e 4.12. Em paralelo ao gerador, colocou-se uma década resistiva, ajustada com um valor de 20Ω , não foi possível realizar

medições com $1\ \Omega$. Esta conexão é mostrada na figura 4.12. Ressalta-se que tanto o gerador de pulsos de descargas parciais quanto a década resistiva foram ligadas ao sistema de aterramento do laboratório da Eletronorte (figura 4.10).



Figura 4.12 – Conexão do gerador de pulsos e da década resistiva à barra.

A fim de tornar o experimento mais próximo ao que acontece na usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, colocou-se duas barras metálicas nos lados da parte reta da bobina utilizada (ver figuras 4.13), com o intuito de caracterizar a influência da ranhura do estator do hidrogerador. Estas barras de aço foram aterradas, o que é mostrado na figuras 4.12 e 4.13.

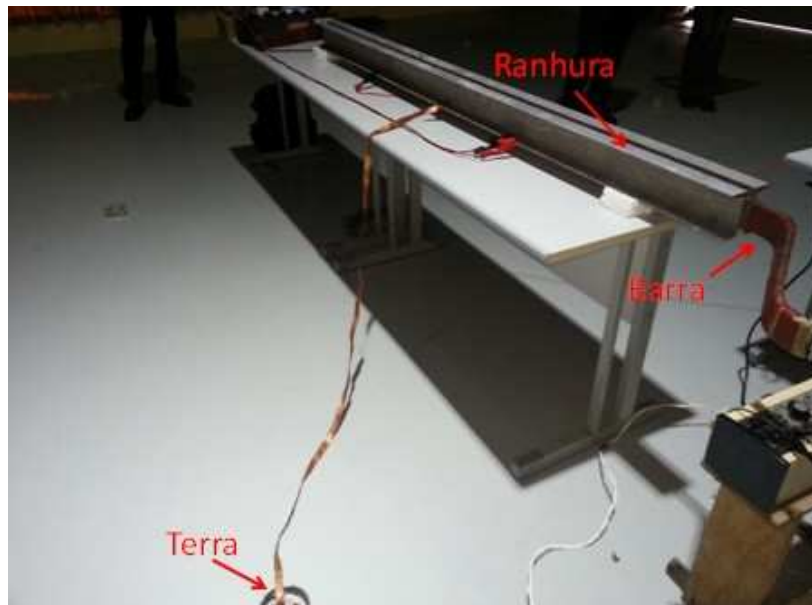


Figura 4.13 – Barra, ranhura e o local de aterramento do experimento.

Na outra extremidade da barra, conectou-se outra década resistiva, ajustada em $100\text{ k}\Omega$ (figuras 4.6 e 4.11 (c)). Conectou-se também o osciloscópio, para medir a tensão V_2 , figura 4.6, na saída da barra.

Uma visão geral do setup do ensaio realizado é mostrada na figura 4.14.



Figura 4.14 – setup do ensaio realizado na Eletronorte – Miramar

O sinal produzido pelo gerador de funções no osciloscópio. O sinal obtido é mostrado pela figura 4.15.

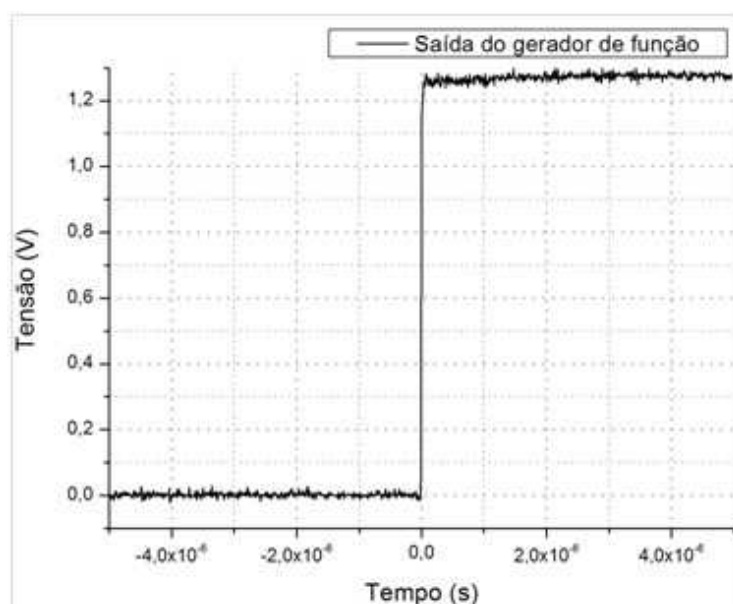


Figura 4.15 – Sinal gerado pelo gerador de funções.

A tensão transitória V_1 também foi medida no osciloscópio, e o resultado é o sinal da Figura 4.16.

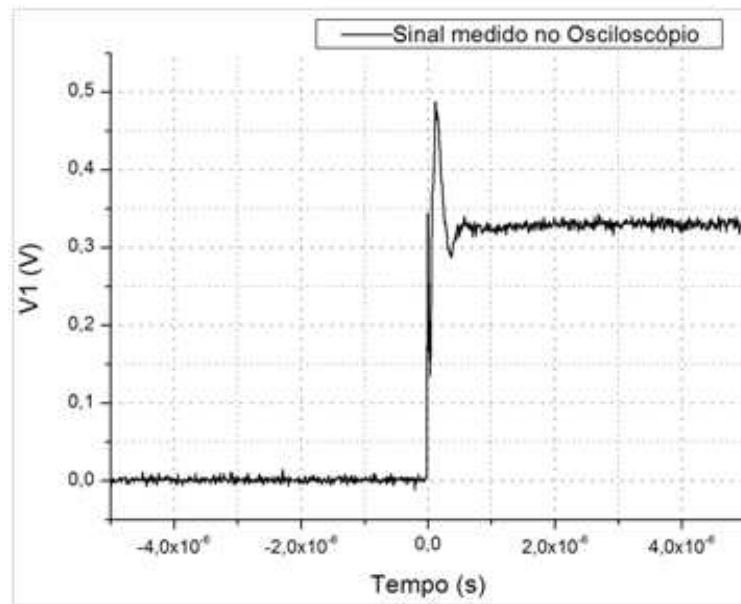


Figura 4.16 – Tensão $V1$ medida no osciloscópio

Da mesma forma, a tensão $V2$ também foi medida no osciloscópio. O sinal obtido é mostrado na figura 4.17.

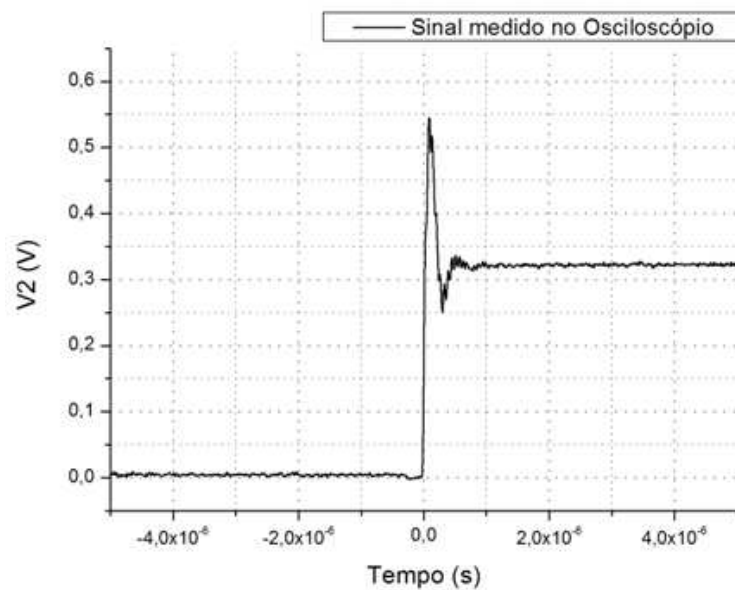
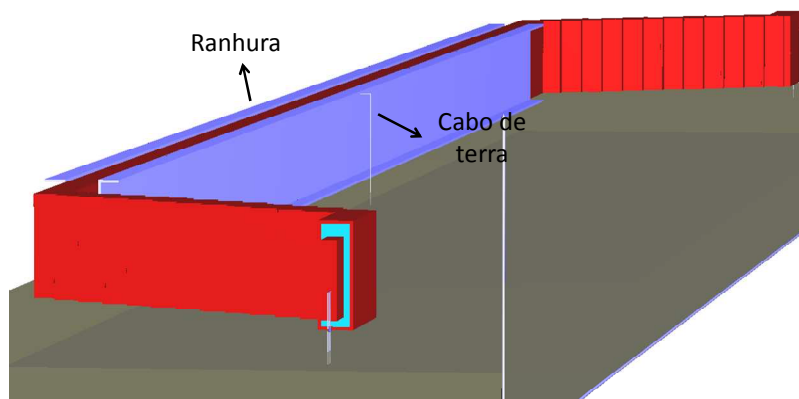


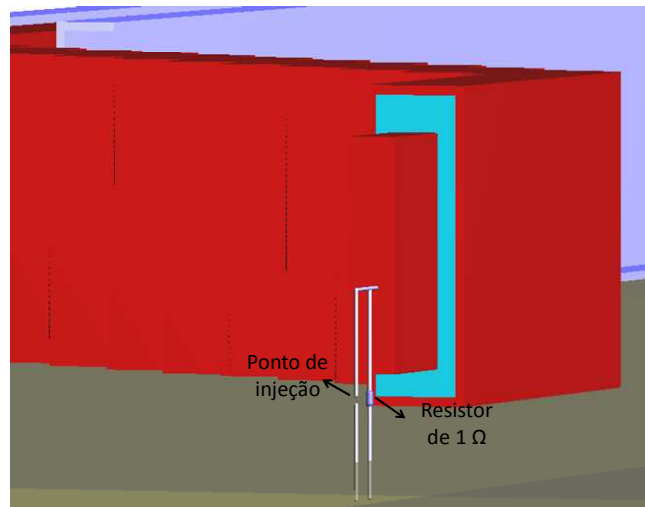
Figura 4.17 – Tensão $V2$ medida no osciloscópio

Um modelo numérico desta barra foi construído no *software* LANE SAGS. A figura 4.18 ilustra este modelo numérico (imagens do *software* simulador).

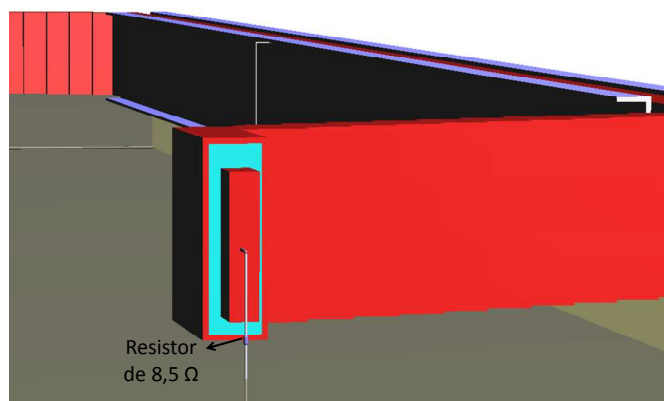
Foi injetado um sinal semelhante ao usado no experimento, no local indicado na figura 4.18 (a). A figura 4.19 mostra o sinal injetado na barra. Mediu-se a tensão $V1$ sobre o resistor de $1\ \Omega$ e a tensão $V2$ sobre o resistor de $8,5\ \Omega$. A forma de onda destas tensões é mostrada nas figuras 4.20 e 4.21.



a)



b)



c)

Figura 4.18 – Representação do modelo numérico da barra utilizada nos experimentos: a) Visão geral do modelo numérico da barra, b) Detalhe do ponto de injeção e resistor de 1 Ω , c) Detalhe do resistor de 8,5 Ω .

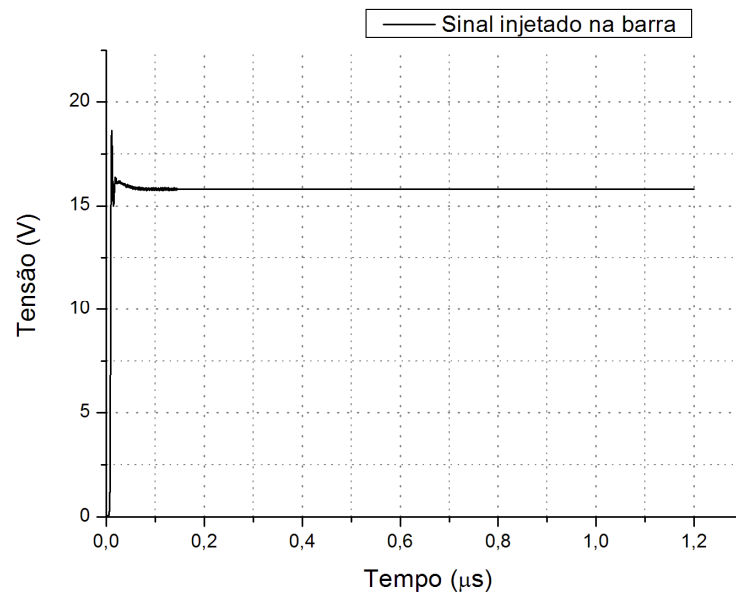


Figura 4.19 – Forma de onda do sinal injetado na barra na simulação.

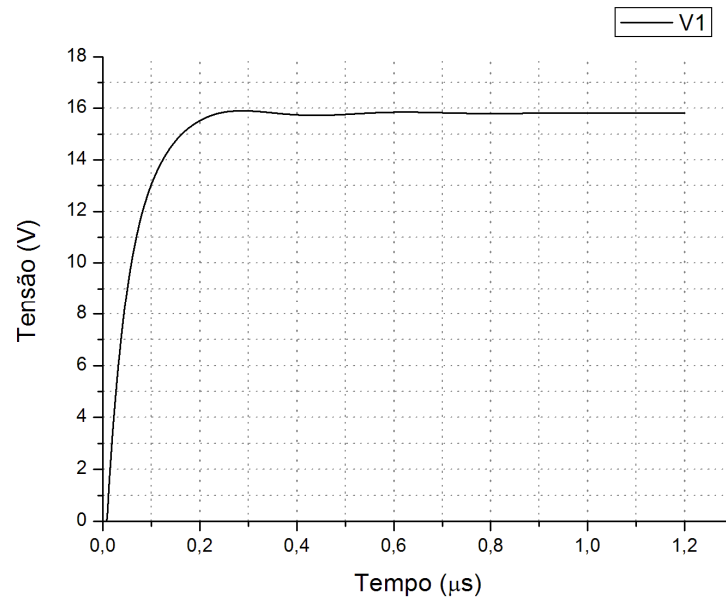


Figura 4.20 – Forma de onda de V1 medido na simulação.

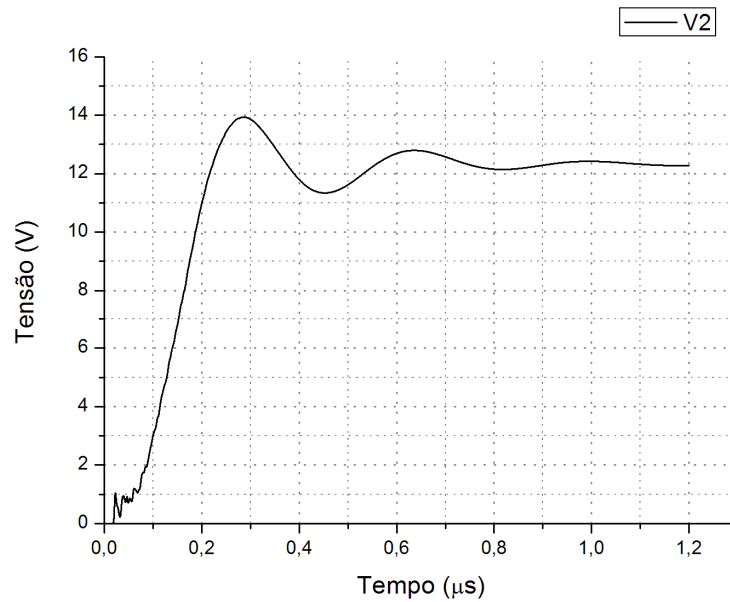


Figura 4.21 – Forma de onda de V2 medido na simulação.

Observa-se que os sinais obtidos na simulação estão coerentes com os resultados apresentados em [83]. Apesar de os comportamentos do experimento e da simulação numérica serem semelhantes, há diferenças entre as formas de onda. Tais diferenças se justificam pelo fato de que a tensão medida experimentalmente V1 (figura 4.16) está em níveis bem abaixo do sinal injetado (figura 4.15). Isto aparentemente está relacionado com níveis de corrente solicitados pela carga acima do limite da fonte. Isto deverá ser corrigido em breve utilizando-se uma fonte de maior capacidade de corrente (ou injetando-se tensões menores). Nota-se que este efeito não é observado em [83].

4.1.4. Detalhes da Modelagem e Resultados das Simulações

Nesta seção, são apresentados os resultados de algumas simulações realizadas utilizando o SAGS, *software* que utiliza o método FDTD-3D para a resolução numérica das equações de Maxwell.

O *grid* computacional retangular criado para representar o espaço consiste de $848 \times 254 \times 165$ células cúbicas de Yee, com aresta $\Delta = 2$ mm. A representação matemática do pulso da descarga segue [84]. A figura 4.22 (a) ilustra a forma de onda da fonte de tensão utilizada para modelar as descargas, em função do tempo. No eixo das ordenadas, está o valor da tensão, em Volts, e no eixo das abscissas está o tempo, em segundos. A figura 4.22 (b) ilustra o espectro da fonte de tensão.

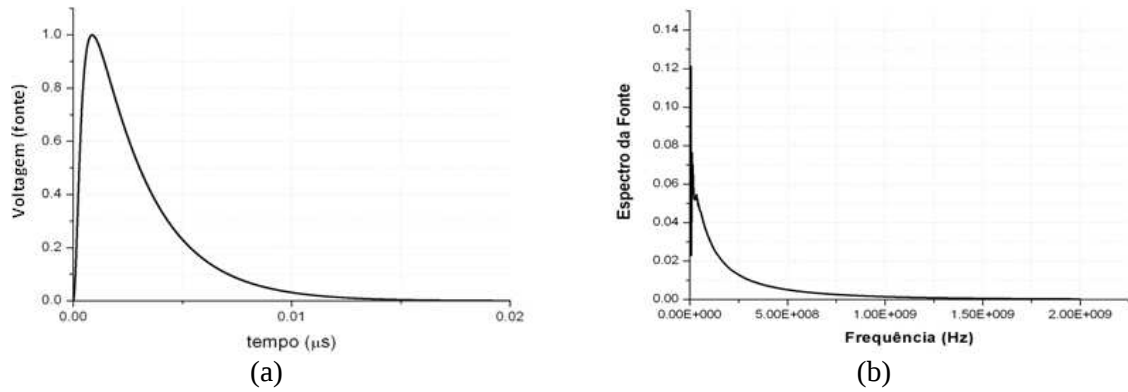


Figura 4.22 – (a) Forma de onda normalizada da fonte de excitação utilizada para modelar descargas parciais, (b) Espectro da fonte de excitação.

Para efeito de simplificação de análise e definição das regiões de ocorrência das descargas, foi estabelecida uma variável de comprimento L , dada em metros, que representa uma aproximação da posição destes pontos de interesse ao longo da linha tracejada indicada na figura 4.23. Adicionalmente, foram definidos os quadrantes de Q1 a Q4. Para captar os sinais relativos às descargas, modelou-se um sensor de campo elétrico na estrutura, cuja posição é indicada por S na figura 4.23. A localização de S é compatível com a posição de um sensor real instalado no hidrogerador de Coaracy Nunes, no Amapá.

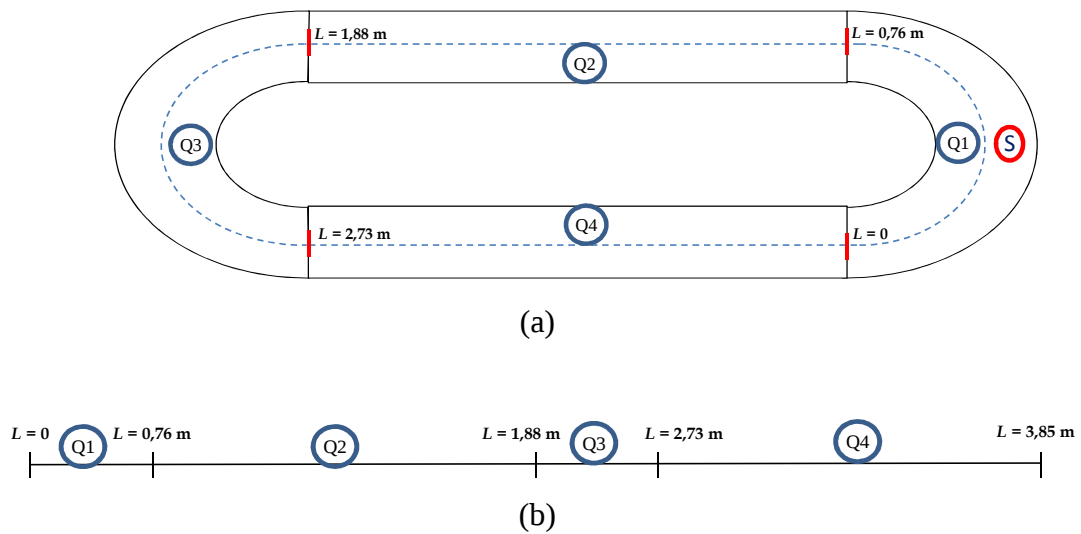


Figura 4.23 – (a) corte de uma barra e a relação da variável L com as regiões da estrutura; (b) variável L em um sistema unidimensional de coordenadas.

4.2. MÚLTIPLAS DESCARGAS NA ISOLAÇÃO DE UMA BOBINA DO HIDROGERADOR

Para análise de múltiplas descargas foi utilizada técnica espectral proposta para diagnóstico da bobina do hidrogerador descrita em [85, 86]. Os sinais das descargas parciais propagam-se através da estrutura e sofrem múltiplas reflexões, especialmente nas partes metálicas. Os sinais têm sua velocidade de propagação reduzida (em relação à velocidade da

luz no vácuo) devido a permissividade relativa da isolamento. Além disso, os sinais são atenuados devido à (baixa) condutividade elétrica da mica e devido à expansão natural da onda. Dessa forma, os sinais transitórios recebidos pelo sensor (Figura 4.24) são fortemente dependentes da posição da(s) descarga(s).

Considerando-se que cada par transmissor (onde ocorre a descarga) e receptor (antena) constitui um canal de propagação único, ver figura 4.24 (a), verifica-se que cada parte da bobina, onde uma descarga ocorre, produz um padrão espectral próprio, no qual ocorrem máximos e mínimos locais característicos da região espacial considerada. Elaborou-se, dessa forma, uma rotina computacional que identifica as frequências onde há máximos e mínimos locais nos espectros, de forma que um banco de dados foi elaborado, contendo tais frequências e a região da bobina associada a esses harmônicos. Este banco é utilizado para estimar a região onde há uma ou mais descargas.

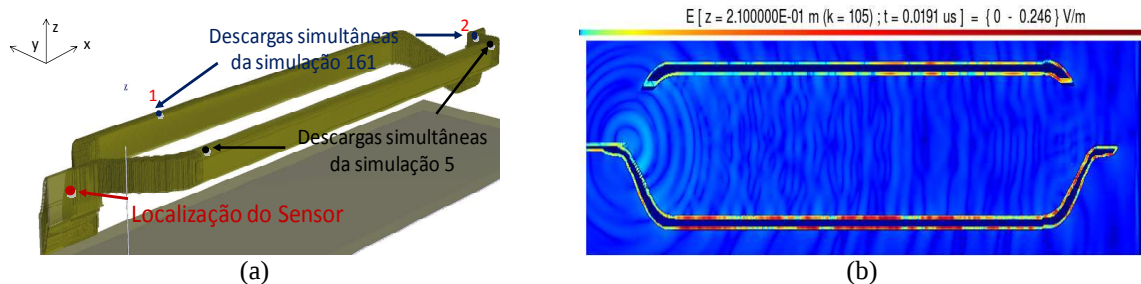


Figura 4.24 – (a) Localização do sensor (antena) e localização das descargas simultâneas para as simulações 5 e 161; (b) Visualização da propagação do campo elétrico para $t = 0,0191 \mu s$ (plano x-y que intercepta o baricentro da barra)

Para uma única bobina do estator do hidrogerador analisado, foram realizadas várias simulações de ocorrência de descargas parciais simultâneas. Para fins ilustrativos, mostra-se na figura 4.24 (b) a distribuição do campo elétrico em um plano horizontal (paralelo ao plano x-y) situado na coordenada z média da bobina. Cores avermelhadas significam maiores intensidades de campo e cores próximas ao azul identificam menores magnitudes.

A figura 4.25 mostra os resultados obtidos usando o método de diagnóstico proposto neste trabalho. No eixo horizontal, tem-se L (em m) e o eixo vertical apresenta o índice das simulações realizadas. Foi realizado um total de 231 experimentos numéricos, nos quais diversas posições de ocorrência de descargas parciais foram simuladas ao longo de L (de zero a 3,866 m). O mapa de cores representa os valores assumidos pela variável p, que, como discutido anteriormente, é proporcional à probabilidade de ocorrência de descargas. Os retângulos em cinza indicam a localização exata das descargas parciais, tal como definido nas simulações. As figuras apresentam adicionalmente uma barra de cores que ilustra a correspondência dos valores assumidos por p com as cores vistas no gráfico de diagnóstico.

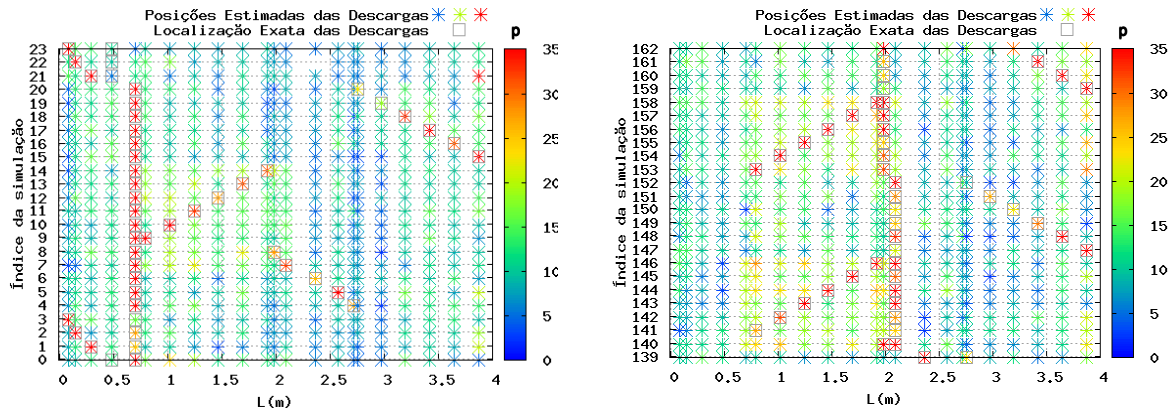


Figura 4.25 – Estatística de localização de descargas para uma única bobina.

Em cerca de 90 % das simulações, o programa computacional aqui desenvolvido, baseado no método proposto, gerou informações estatísticas capazes de fornecer estimativas precisas a respeito da posição das duas descargas simuladas. Nos restante dos casos, o método localizou corretamente a primeira descarga e indicou locais próximos da posição real da segunda descarga. Em 60 % dos casos, desvios máximos de 0,5 m em relação a posição real da segunda descarga foram observados. Em apenas 6,7% dos testes, desvios entre 0,5 m e 1 m foram vistos. Em 30% das simulações, notaram-se desvios de 1 m a 1,5 m. Finalmente, em apenas 3,3 % dos casos, a posição foi estimada com desvios maiores que 1,5m.

Para o diagnóstico de múltiplas descargas na isolação de duas bobinas adjacentes e conectadas do hidrogerador também apresentaram resultados satisfatórios [85,86].

4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma nova metodologia para localização de Descargas Parciais, baseada em análise espectral, foi desenvolvida [85 e 86]. Validou-se o *Software SAGS* para análise de propagação de descargas parciais em barras estatóricas. Com isso, utilizou-se o método FDTD para realizar as simulações e a modelagem eletromagnética do problema. Realizou-se a localização de múltiplas descargas parciais ocorrendo em uma única bobina do hidrogerador e em duas bobinas adjacentes interligadas. Em síntese, a técnica é baseada na determinação das frequências nas quais máximos e mínimos ocorrem no espectro do sinal transitório registrado pelo sensor. Com essas informações, um mapa de probabilidades de ocorrência das descargas, em função do espaço, é obtido e, com ele, é possível obter visualmente as regiões nas quais há maior possibilidade de haver problemas na isolação.

Para o caso de apenas uma bobina, em aproximadamente 90% das simulações foram obtidas estimativas precisas da localização das duas descargas simuladas. Nos outros 10% das

simulações, a primeira descarga foi localizada corretamente e locais próximos à posição exata da segunda descarga foram estimados, com até 1,5 m de desvio.

Da mesma forma, para duas bobinas adjacentes, em cerca de 81% das simulações realizadas foi possível estimar a localização exata das duas descargas parciais simultâneas.

Os resultados obtidos comprovam a eficácia do método de localização proposto neste trabalho. Para trabalhos futuros, planeja-se verificar a influência de ruídos na metodologia proposta e verificá-la experimentalmente.

5. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As seções a seguir possuem dois objetivos: apresentar o simulador de DP implementado e detalhar uma proposta de estratégia para identificar o pico de uma DP. A implementação do simulador decorreu da necessidade de se ter exemplos de sinais que, mesmo não sendo muito representativos de DP reais, permitissem testar algumas técnicas simples de identificação de pico. Tal identificação, passa pela determinação dos pontos inicial e final de uma DP, estabelecendo assim uma janela temporal para busca dos valores de pico da DP. Por sua vez, esses valores de pico são fundamentais para se traçar os gráficos conhecidos como PMA (*pulse magnitude analysis*) e PPA (*pulse phase analysis*), também conhecido por PRPD (*phase resolved partial discharge*) e no Brasil por mapa estatístico de DP, ambos usados para caracterizar o estado de equipamentos de alta tensão [90], [4].

Sobre o simulador, abordamos suas principais características enfatizando que, apesar da atual implementação ser realmente bastante simples, sua estrutura pode ser utilizada para simuladores mais sofisticados pela simples substituição de alguns de seus blocos por modelos de melhor qualidade.

Em relação à estratégia de detecção de pico da DP, apresentamos os detalhes da sua concepção e implementação, bem como alguns resultados preliminares.

5.2. ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE PICO DE DESCARGA PARCIAL

Para simulação de identificação de início e fim de DP, bem como localizar e determinar seu pico considerou-se que o sinal recebido do simulador foi devidamente filtrado para eliminação do ruído e da onda de 60 Hz. Portanto, a única componente de análise é o sinal contendo as DP. As informações de fase da onda de 60 Hz associadas ao pico das DP são assumidas conhecidas. A figura 5.1 apresenta um sinal contendo várias DP ocorridas num determinado intervalo de tempo.

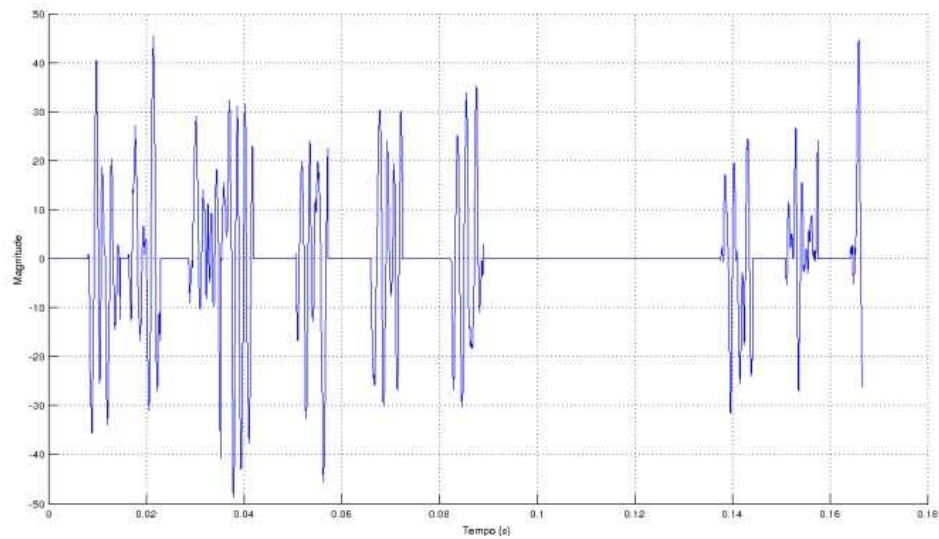


Figura 5.1 – Sinal contendo as DP a serem analisadas.

5.3. FAIXA DE NÃO OCORRÊNCIA DE DP

A identificação do pico de uma DP é feita à medida que as amostras do sinal são obtidas, ou seja, a identificação é feita amostra-a-amostra. Para se fazer essa identificação, é necessária uma estratégia para verificar a ocorrência ou não de uma DP. Essa verificação é feita estabelecendo-se um valor limiar, que define uma faixa de não ocorrência de DP. Uma DP ocorre quando o valor da amostra atual é maior em módulo que valor do limiar, ou seja, quando o valor da amostra está fora da faixa de não ocorrência de DP. Na figura 5.2, a linha pontilhada vermelha apresenta um limiar de 2 unidades de magnitude em módulo, ou seja, a faixa de não ocorrência de DP está entre -2 e 2 unidades de magnitude que pode ser configurável de acordo com a medição.

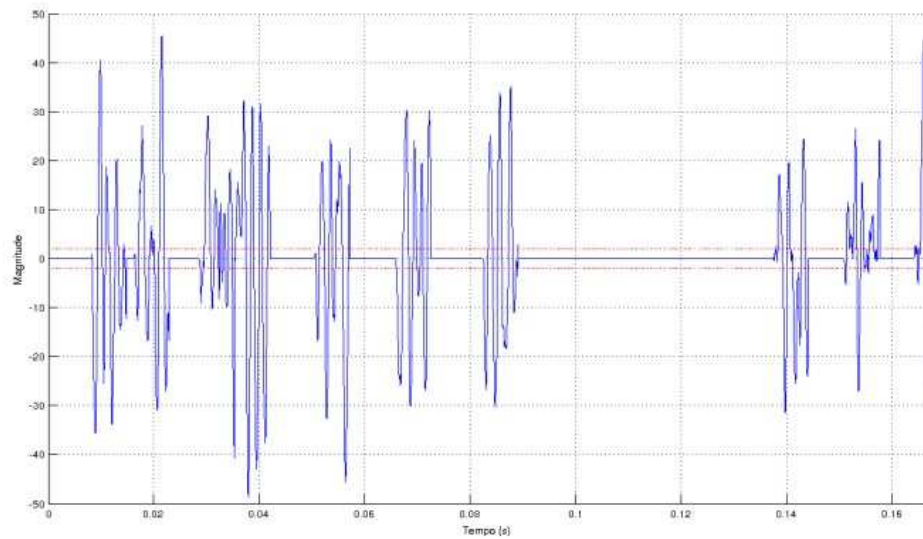


Figura 5.2 – Faixa de não ocorrência de DP.

5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA ESTRATÉGIA

A figura 5.3 apresenta o resultado da estratégia de identificação de início, fim e pico de uma DP aplicado ao sinal da figura 5.1. Reforça-se o fato da análise ser feita amostra-a-amostra e sem a presença de outro sinal que a DP. Os círculos na figura 5.3 marcam o início e fim das DP e os asteriscos vermelhos marcam os valores de pico.

Os resultados encontrados demonstram que a abordagem utilizada consegue identificar, como proposto, o início, o fim e o pico das DP. Contudo, alguns erros podem ocorrer na identificação de DP que estejam muito próximas umas das outras. Os valores do limiar e do tempo mínimo para identificação do fim de DP precisam ser definidos de acordo com as características do sinal de DP e dos equipamentos utilizados para geração das amostras.

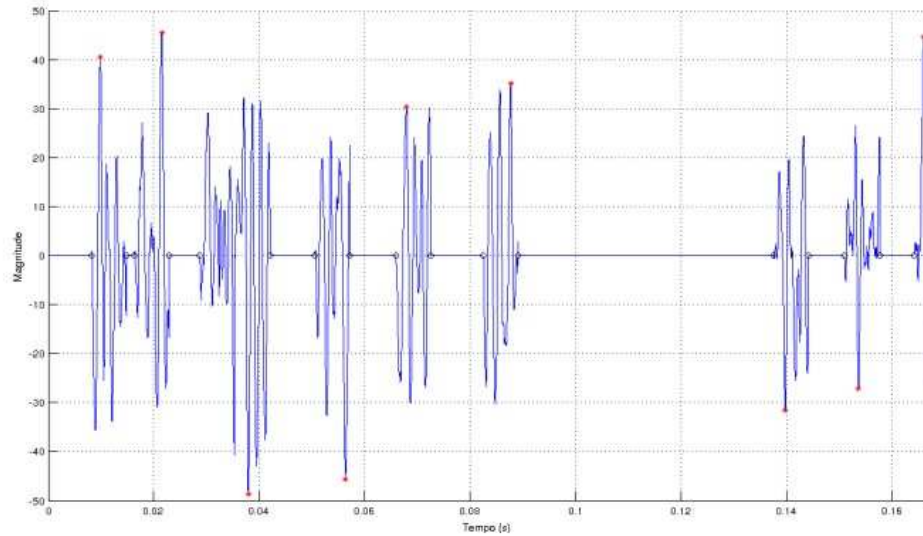


Figura 5.3 – Valores de início, fim e pico de DP.

5.5. ESTIMADOR DE FASE DA ONDA SENOIDAL

Na prática, a fase precisa ser estimada a partir das amostras do sinal senoidal obtidas por um canal de aquisição auxiliar ou mesmo por filtragem digital que permita a separação da senoide de 60 Hz das descargas parciais.

Assim, foi implementado um estimador de fase que assume a disponibilidade de uma senoide discreta de frequência e defasagem arbitrárias e que é baseado na contagem das amostras de um ciclo. Tal contagem, em conjunto com o valor da frequência de amostragem, permite estimar um valor de fase para qualquer ponto do ciclo.

Nas figuras 5.4 e 5.5 são apresentados resultados que mostram o bom desempenho da técnica. Nas simulações, foi usada uma frequência de amostragem de 1 MHz para uma senoide de 60 Hz. O aumento de valor da frequência de amostragem, esperado no sistema real, leva a um melhor desempenho, pois os pontos de início e fim de ciclo são melhores determinados.

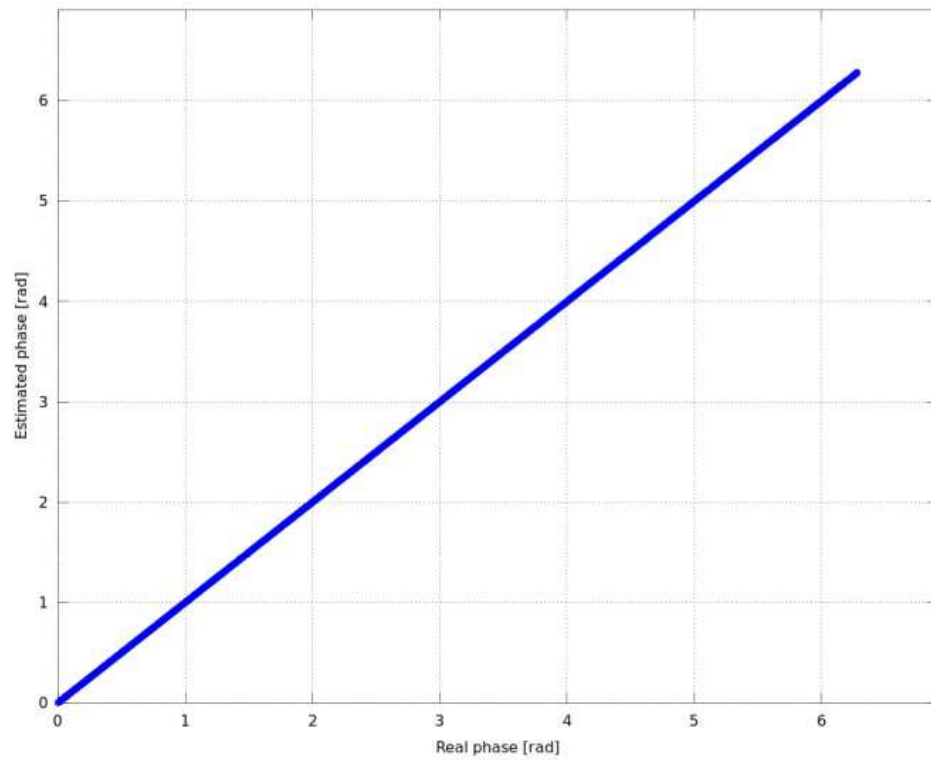


Figura 5.4 – Gráfico entre Fase Real e Fase Estimada.

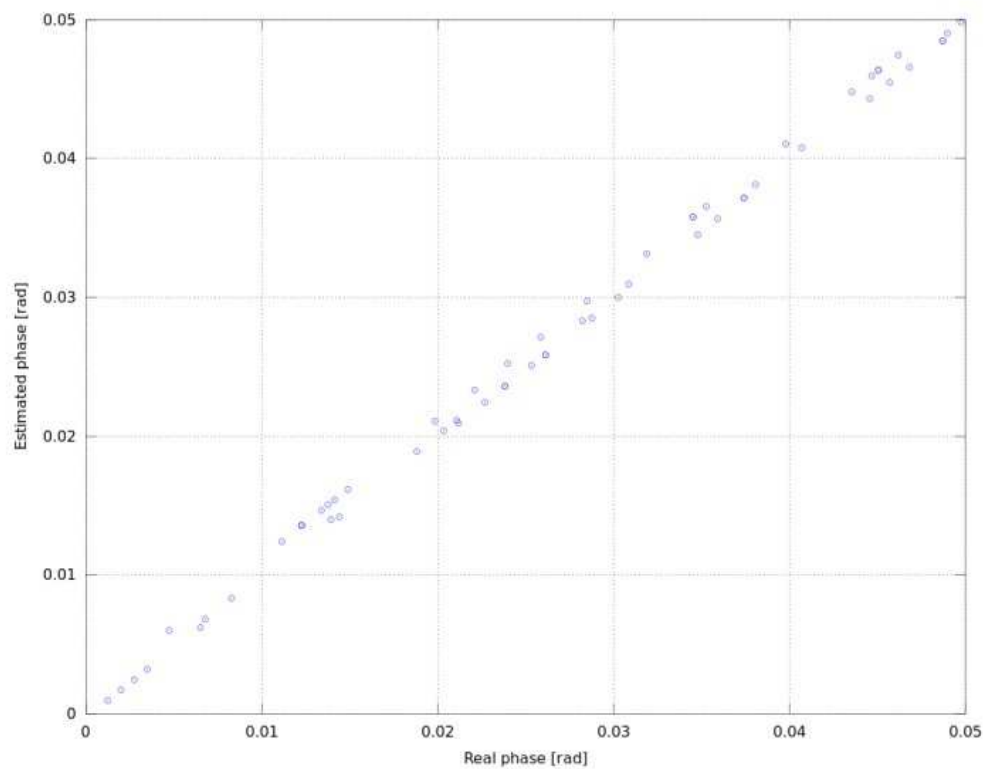


Figura 5.5 – Gráfico entre Fase Real e Fase Estimada (detalhe).

5.6. IMPLEMENTAÇÃO EM LABVIEW DO SIMULADOR DE DESCARGAS PARCIAIS

O ambiente desenvolvido em LabView [91]-[93] conta com a interface apresentada na figura 5.6, na qual podem ser visualizados os gráficos com o sinal senoidal de 60 Hz, o gráfico do sinal de descarga parcial e o gráfico com sinal de ruído separadamente.

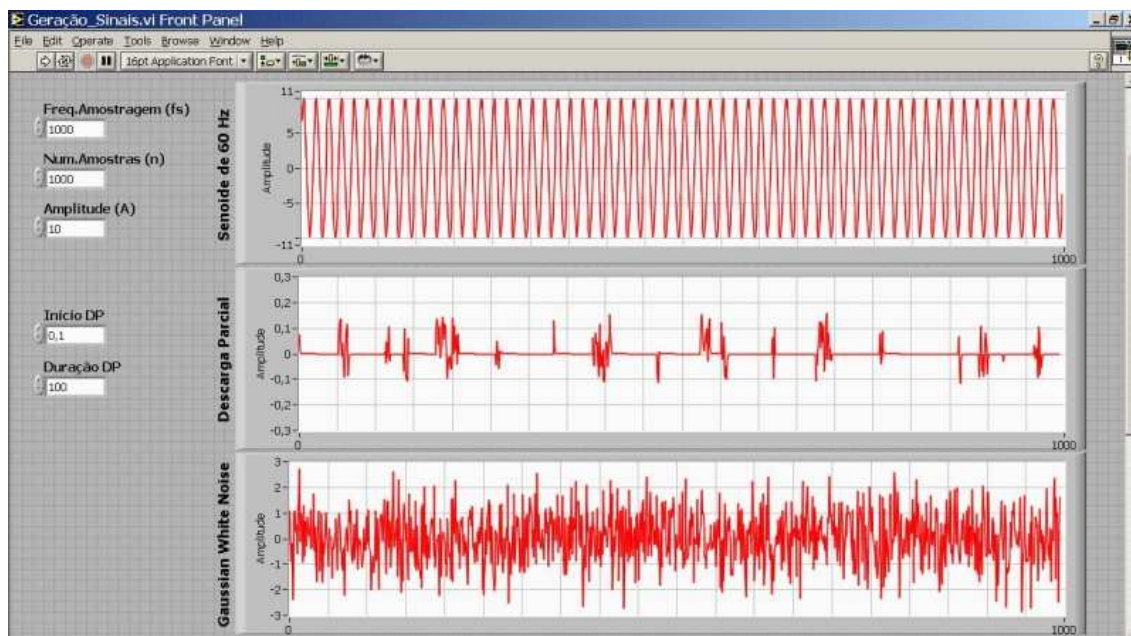


Figura 5.6 – Interface do ambiente em LabView.

Em relação à simulação do sinal senoidal de 60 Hz, figura 5.6, o usuário pode fazer o ajuste dos parâmetros: *frequência de amostragem*, *número de amostras* e *amplitude do sinal*.

O sinal de descarga parcial, figura 5.6, gerado pelo simulador, pode ter suas características modificadas de acordo com os valores atribuídos pelo usuário para os parâmetros: *Início DP* e *Duração DP*. O parâmetro *Início DP* determina a probabilidade de ocorrência das descargas parciais em tempo de simulação. Por sua vez, o parâmetro *Duração DP* define o comprimento de cada descarga parcial segundo uma determinada distribuição de probabilidade. As descargas parciais correspondem à resposta de um filtro linear a uma entrada aleatória. Nesse caso, pode-se também alterar os coeficientes do referido filtro para que as descargas parciais obedeçam a modelos mais ou menos realísticos.

A simulação do sinal de ruído, figura 5.6, foi feita utilizando uma função já existente no LabView denominada *Gaussian White Noise*. O usuário tem a possibilidade de definir o valor da variância desse ruído.

Posteriormente, os três sinais gerados de forma isolada são somados para representar o sinal de entrada dos sistemas de aquisição e posterior análise de descargas parciais, figura 5.7 e os valores de início, fim e pico de DP, são definidos, figura 5.8.



Figura 5.7 – Somatório de todos os sinais.

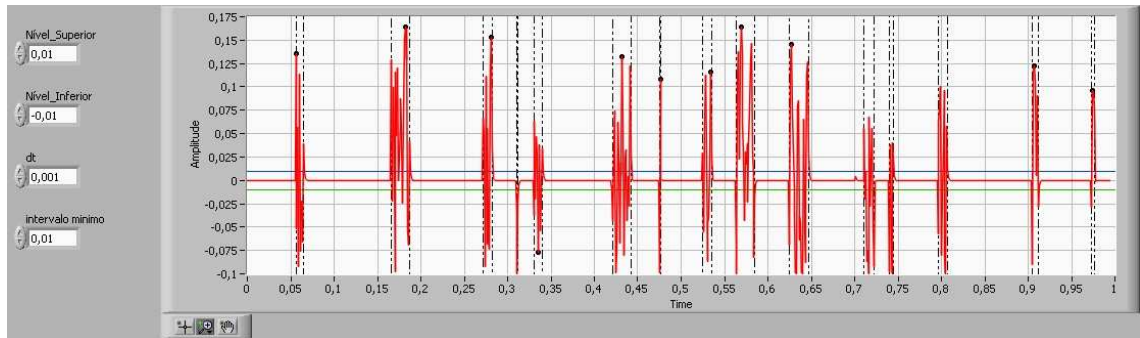


Figura 5.8 – Valores de início, fim e pico de DP, implementados no labview.

5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do simulador virtual decorreu da necessidade de se ter exemplos de sinais, que mesmo não sendo muito representativos de descargas parciais reais, permitissem testar algumas técnicas simples de identificação de picos de descargas. Tal identificação, passa pela determinação dos pontos início e término de uma DP, estabelecendo assim uma janela temporal para busca dos valores de pico da DP. Por sua vez, esses valores de pico são fundamentais para se traçar os gráficos conhecidos como PMA (*pulse magnitude analysis*) e PPA (*pulse phase analysis*), ambos usados para caracterizar o estado de equipamentos de alta tensão e serão detalhados no capítulo seguinte.

6. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A seguir serão apresentados o circuito de medição e o protótipo do sistema desenvolvido.

6.2. CIRCUITO DE MEDIÇÃO

Na figura 6.1 ilustra-se um circuito de medição para um único acoplador instalado em uma fase. No lado de baixa tensão de cada capacitor, ou seja, em sua blindagem é conectado um cabo de medição que encaminha o sinal de corrente das DP até uma caixa de terminais localizada na parte externa do gerador. Nessa caixa de terminais há um resistor em paralelo no valor de cerca de $2000\ \Omega$ para cada cabo coaxial vindo de cada acoplador.

A partir dessa caixa de terminais são lançados os cabos até a entrada do sistema de monitoramento montado em um rack padrão 19”.

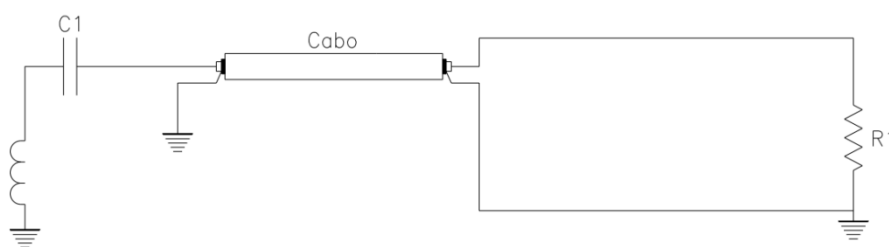


Figura 6.1 – Circuito de medição de DP. À esquerda, temos um circuito de uma das fases, onde se conecta um capacitor de acoplamento. À direita, temos a impedância de medição.

6.3. INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA

A instrumentação proposta pelo sistema foi desenvolvida numa plataforma comercial PXI de tal maneira que se pudesse desenvolver um produto o mais aberto possível, obedecendo a critérios tais como:

- Montagem de hardware modular de tal forma que seja mais fácil de atualizar o sistema e envolver custos menores de manutenção ao longo dos anos;
- Facilidade de desenvolvimento de software, separando-se os desenvolvimentos dos processos de aquisição dos processos de armazenamento, análise e ferramentas de diagnóstico;

- c) Redução de custo de instalação posto que um sistema pode atender várias Máquinas, no caso específico da usina de Coaracy Nunes atende as três unidades, sem que haja uma limitação do número de acopladores que podem ser instalados.

A medição de Descargas Parciais é realizada no domínio do tempo com uma instrumentação digital com capacidade de amostragem de até 100 MS/s. Como o ambiente de usina possui diversas fontes de ruídos eletromagnéticos com as mais variadas faixas de frequência, foi necessário um condicionamento intermediário de sinais de tal forma que apenas os componentes de interesse alcançassem o instrumento de medição. Na verdade esse condicionamento de sinais deveria ser mais customizado e realizado de diferentes maneiras conforme as características de cada enrolamento estatóricos que se quisesse monitorar visto que é mais importante a sensibilidade de medição em detrimento do valor absoluto da grandeza comparada entre os diversos geradores. A seguir há um diagrama esquemático das ligações físicas estabelecidas nas unidades geradoras CNUGH-01, 02 e 03, de Coaracy Nunes.

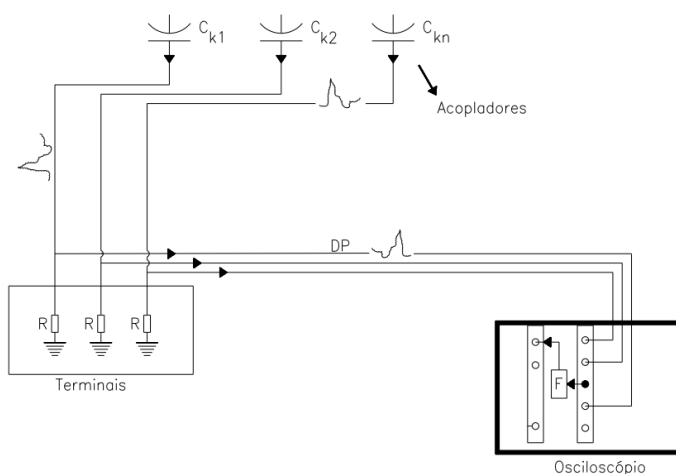


Figura 6.2 – Diagrama esquemático das ligações físicas das unidades geradoras de Coaracy Nunes.

Como já foi dito, as Descargas Parciais são pulsos de corrente ao longo do tempo, com alta taxa de repetição e de velocidade altíssima, originando uma quantidade de pulsos muito grande ao longo do tempo de medição, que pode ser um minuto, por exemplo. Desta forma, armazenar toda essa informação seria imprudente do ponto de vista computacional. Assim sendo, foi estabelecido o denominado mapa estatístico representativo das DP. Este mapa na realidade possui três grandezas que são armazenadas conjuntamente, amplitude da descargas (mV ou pC) – eixo y, ângulo da tensão com relação ao sinal de referência de 60 Hz – eixo x e o número de descargas – eixo z (repetição), representada pelo gráfico em cores, ver figura 6.9.

O esquema do processamento realizado pelo Sistema está apresentado na figura 6.3. É com base nesses mapas que se realizarão as análises e os diagnósticos em que se pretende

estabelecer regras capazes de auxiliar na tomada de decisão com base na ocorrência de DP nos enrolamentos estatóricos de uma determinada máquina [43].

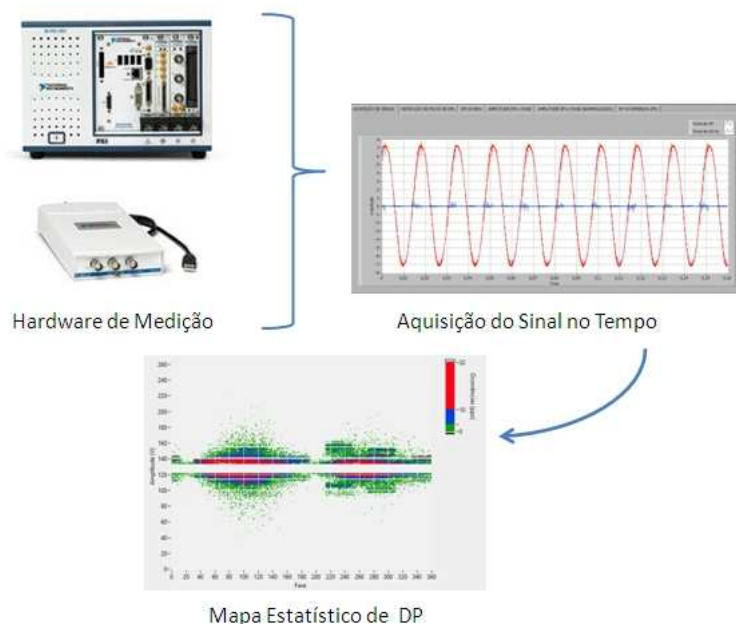


Figura 6.3 – Esquema do Processamento de Sinais de DP.

6.4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O software de medição de DP denominado SIM-DP começou a ser desenvolvido a partir de uma rotina no LabView responsável pela aquisição de sinais utilizando o módulo USB-5133 da National Instruments. Após a realização de alguns testes de aquisição nesse módulo, foi feito o desenvolvimento de uma rotina no LabVIEW para aquisição dos sinais de descargas parciais e de 60 Hz utilizando este módulo de aquisição e as funções do toolkit NI SCOPE.

Posteriormente, as rotinas que já tinham sido desenvolvidas no software simulador foram incorporadas ao software de medição de DP.

Com isso, realizaram-se testes de aquisição de sinais utilizando o software de medição de sinais reais de descargas parciais, e verificação do funcionamento das rotinas de detecção de início e fim de descargas parciais e de valores de pico e, também, verificação do funcionamento das rotinas de cálculo de fase das descargas parciais [106].

A interface principal do software de medição mostra a aquisição dos sinais proveniente da impedância de acoplamento, ver figura 6.4, dividido em um sinal de DP, em azul e o sinal de 60Hz, em vermelho.

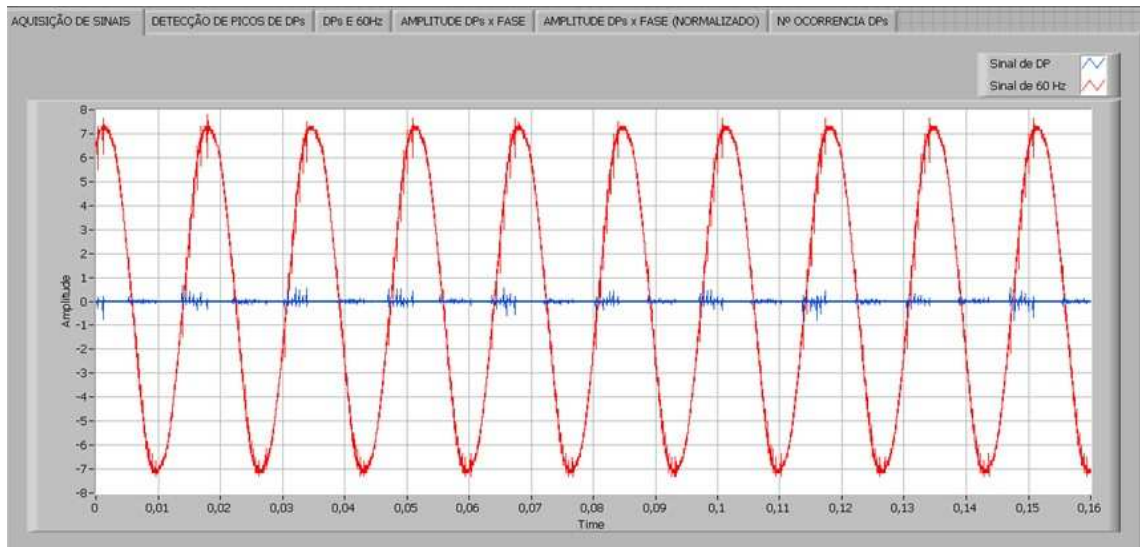


Figura 6.4 – Sinal de DP e sinal de 60Hz.

A figura 6.5 exibe a detecção dos picos de DP, ou seja, os valores máximos absolutos, também são definidos um nível de corte superior e inferior para detecção dos picos e um intervalo mínimo.

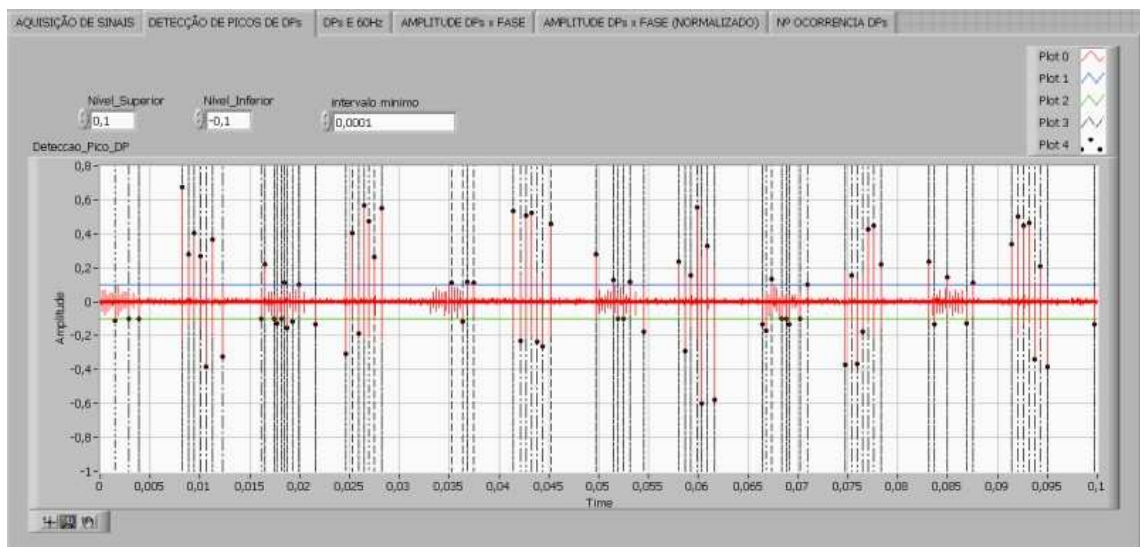


Figura 6.5 – Detecção de picos de DP.

A figura 6.6 exibe o sinal de 60 Hz e ao mesmo tempo os picos de descargas parciais que foram detectados dos vários ciclos do sinal de 60 Hz.

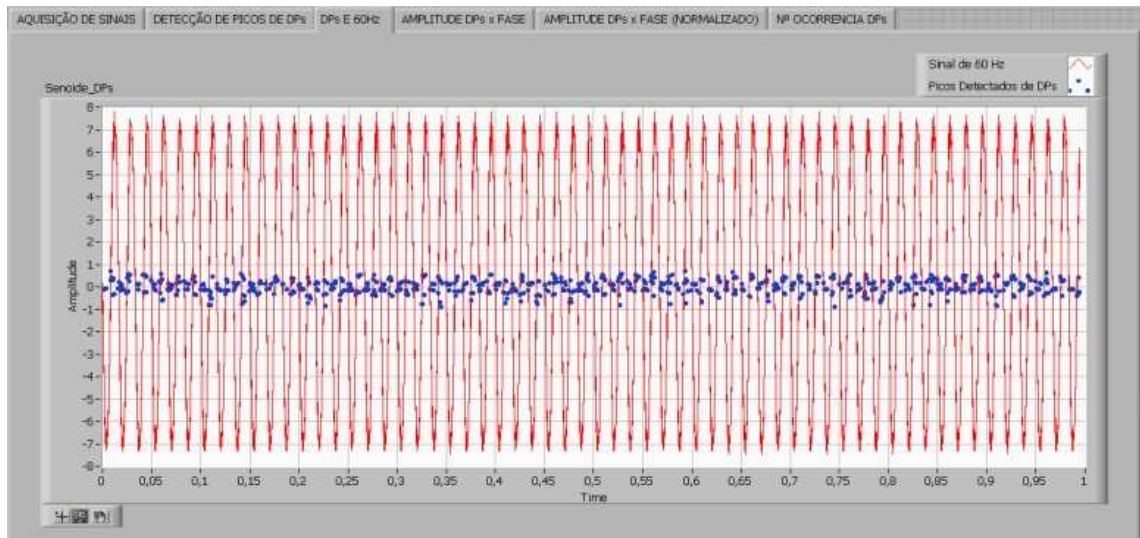


Figura 6.6 – Picos de DP detectados e 60Hz.

Para uma determinada medição, a figura 6.7 apresenta todos os picos detectados (814 pontos) em um segundo que podem ser distribuídos em função da amplitude e ângulo de fase.

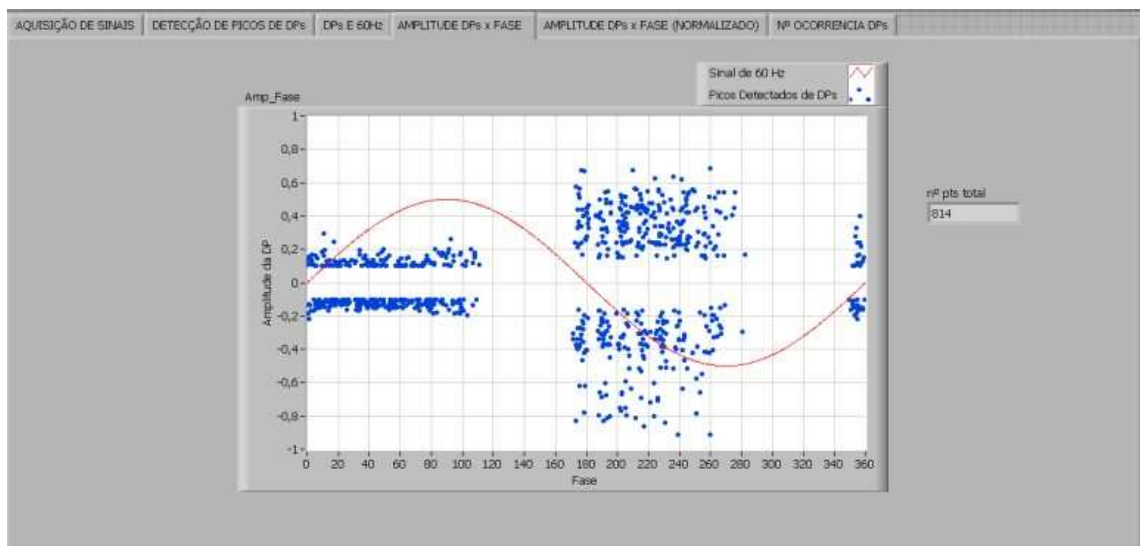


Figura 6.7 – Amplitude DP x fase.

A figura 6.8 exibe o gráfico do número de ocorrências versus a amplitude das DP, ou seja, é possível visualizar o número de ocorrências de um determinado nível de amplitude de descarga parcial.

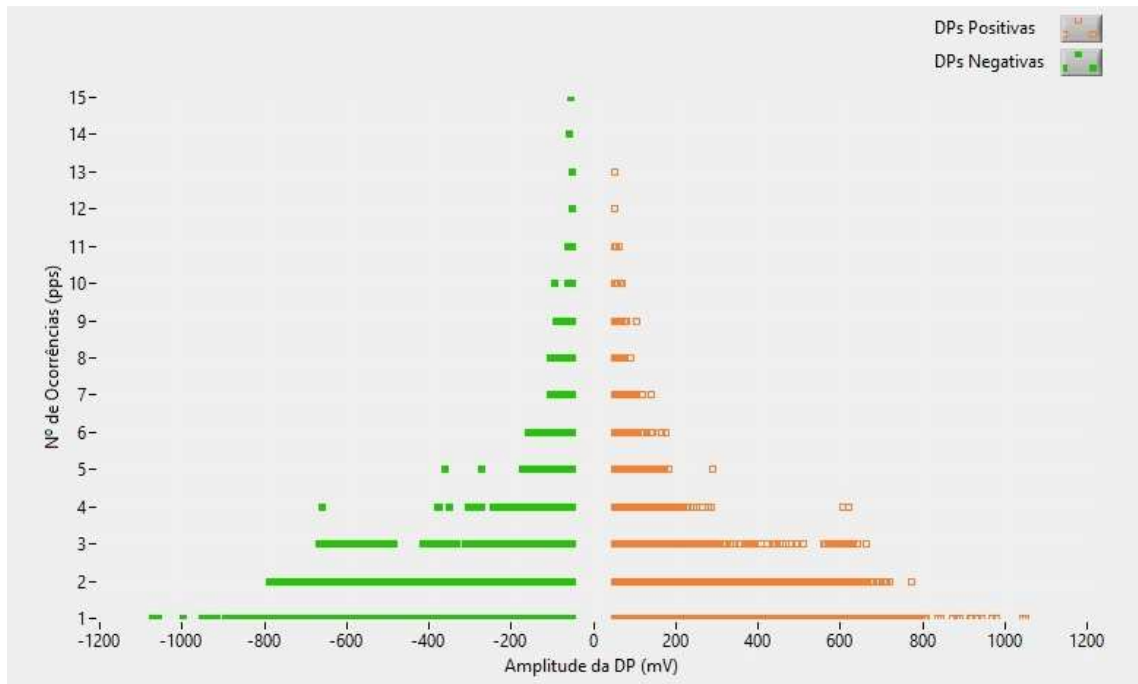


Figura 6.8 – Número de Ocorrência x Amplitude DP (PMA).

Por fim temos o mapa estatístico que mostra a distribuição das descargas parciais por fase e a intensidade com a qual estas descargas ocorreram em uma determinada amplitude e fase, ver figura 6.9.

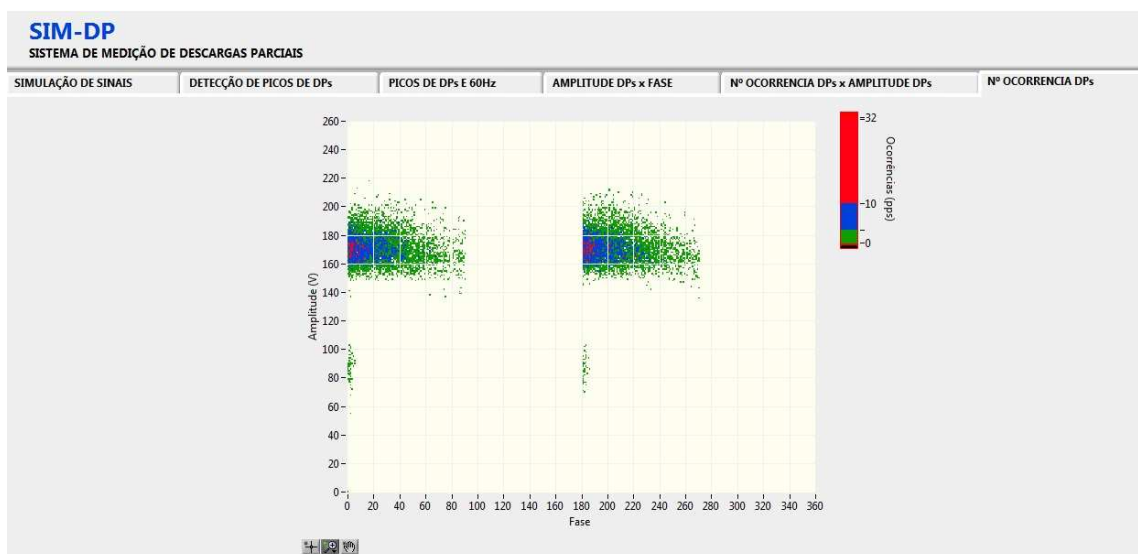
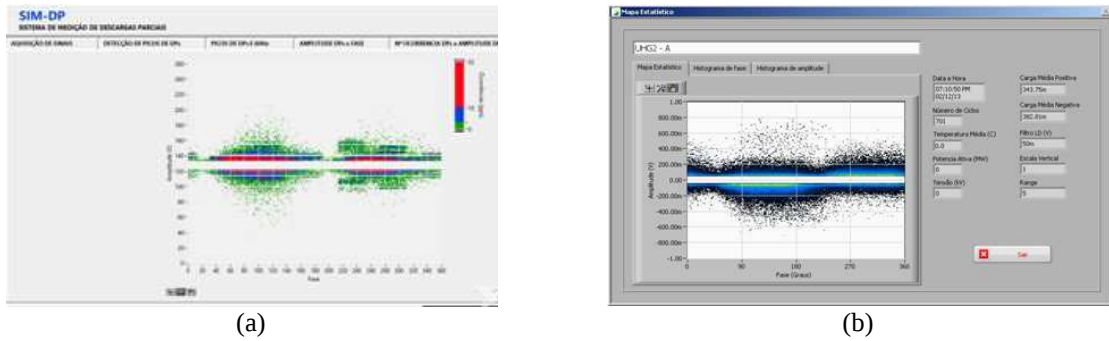


Figura 6.9 – Mapa estatístico.

No ano de 2013 foram feitas medições de sinais de descargas parciais nas unidades de geração hidráulica CNUGH-01, 02 e 03 da UHE Coaracy Nunes. Na figura 6.10 pode-se observar uma certa similaridade na medição realizada com o Sim_DP e o IMA_DP, na fase A, da CNUGH-02.



(a) (b)
Figura 6.10 – Comparação das medições do Sim_DP (a) e IMA_DP (b).

6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentado o sistema de medição de DP (SIM-DP). Especificamente, implementação em LabView de estratégias de detecção e localização do pico de descargas parciais, geração em LabView de gráfico do tipo PMA e PPA e implementação de técnicas de eliminação de faixas específicas. As interfaces do SIM_DP foram apresentadas e descritas de forma sucinta.

7. MEDIÇÕES DE DESCARGAS PARCIAIS NO CAMPO

7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A monitoração de descargas parciais em hidrogeradores é uma técnica consagrada para fins de avaliação de desempenho elétrico do seu sistema isolante. Quaisquer imperfeições construtivas, quer sejam devidas ao projeto ou ao processo de montagem, podem ser detectadas por meio do ensaio de descargas parciais. Neste sentido, o presente capítulo tem como objetivo apresentar os principais resultados da monitoração *online* de descargas parciais instalada na Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHCN), no Estado do Amapá.

7.2. SISTEMA DE MONITORAÇÃO UTILIZADOS NA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Dois sistemas de monitoramento são utilizados na manutenção preditiva da UHCN o IMA-DP e o SIMME.

7.2.1. Sistema de Monitoração de Descargas Parciais (IMA-DP)

A Figura 7.1 apresenta o diagrama do sistema de monitoração instalado na UHE Coaracy Nunes. A instrumentação que compõe o sistema de monitoramento foi desenvolvida numa plataforma comercial de computador industrial padrão PXI, onde está instalado o IMA-DP [104, 105]. Terminal Server é um serviço de computação remota utilizando terminais disseminados pela rede. Neste sistema há um computador servidor para o processamento centralizado, sendo que os computadores desktops conectados a rede funcionam como terminais de acesso. Assim, é possível fazer acesso remoto ao sistema IMA-DP pela rede interna da Eletronorte.

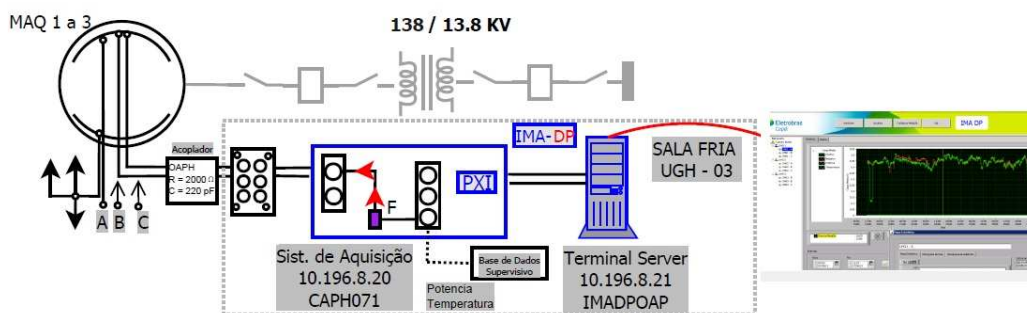


Figura 7.1 – Diagrama do sistema de monitoração de descargas parciais.

7.2.2. Sistema de Monitoramento de Máquinas Elétricas – SIMME

Em paralelo existe o Sistema de Monitoramento de Máquinas Elétricas – SIMME – destinado a monitorar grandezas mecânicas como vibração e pressão, ver figura 7.2 [94], deste sistemas iremos apenas extrair as curvas de tendência de vibração nos mancais dos geradores para avaliar a correlação com os sinais de descargas parciais.

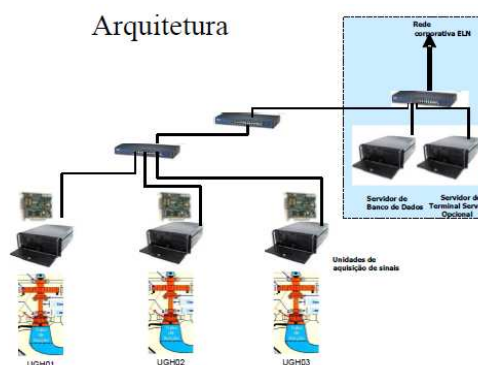


Figura 7.2 – Diagrama o sistema de monitoração do SIMME.

7.3. CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Em dezembro de 2009 foi realizada uma campanha de medição de descargas parciais na máquina CNUGH-03 da UHE Coaracy Nunes [97], verificou-se que a fase V desta máquina apresentava sinais distintos das demais fases com indícios de descargas parciais, na época não era possível atestar sobre a gravidade do defeito, pois não havia histórico. Optou-se por acompanhar os sinais ao longo do tempo de forma a traçar uma curva de tendência. A Figura 7.3 apresenta um dos mapas registrados na época, observou-se a formação de um padrão de DP, e conforme a figura 2.10, este padrão pode ser caracterizado como descarga corona na cabeça das bobinas.

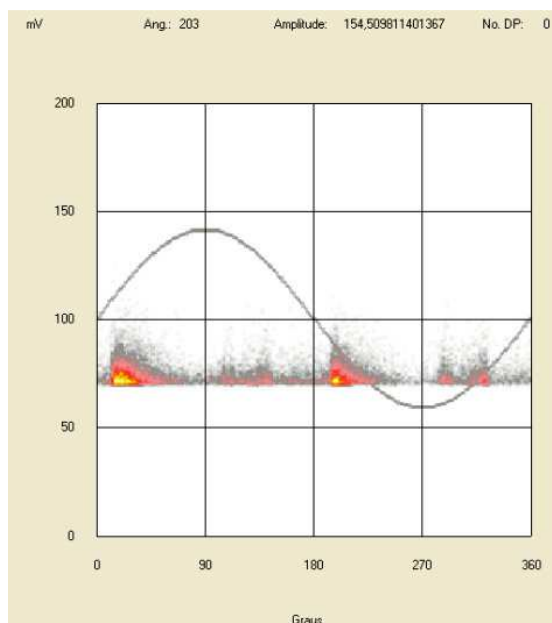


Figura 7.3 – Mapa estatístico de descargas parciais registrado na CNUGH-03.

7.3.1. Inspeção nos Enrolamentos do Estator

Durante a inspeção das bobinas do estator foram identificados pontos de deterioração da superfície das barras na posição entre barra de frente e barra de fundo, na parte inferior do núcleo magnético provavelmente em consequência de efeito corona e possível descargas parciais. As Figuras 7.4 e 7.5 apresentam os registros fotográficos desta inspeção.



Figura 7.4 – Barra de fundo da ranhura 134 apresenta sinal de aquecimento da pintura de acabamento da superfície provocado possivelmente por efeito corona



Figura 7.5 – Barras da ranhura 214 apresentam vazamento de resina da impreguação possivelmente por deficiência no processo de cura e a barra de fundo apresenta sinal de deterioração da superfície possivelmente por efeito corona ou descargas parciais.

7.3.2. Intervenção nos Enrolamentos do Estator

Durante uma intervenção na máquina em que houve a necessidade da retirada do rotor, realizou-se o seguinte procedimento nas barras identificadas nas Figuras 7.4 e 7.5, a Figura 7.6 ilustra o trabalho sendo realizado no estator:

- a) Limpar a região utilizando um pano com Percloretileno ou similar;
- b) Remover o verniz isolante (cor rosa) em torno do dano sem remover a tinta anti-corona;
- c) Lixar levemente a região danificada sem remover a tinta anti-corona;
- d) Limpar a região com um pano seco;
- e) Pintar sobre a isolação e a proteção anti-corona (cor preta) existente com a tinta anti-corona;
- f) Após cura da tinta anti-corona, pintar a região danificada com o verniz isolante.

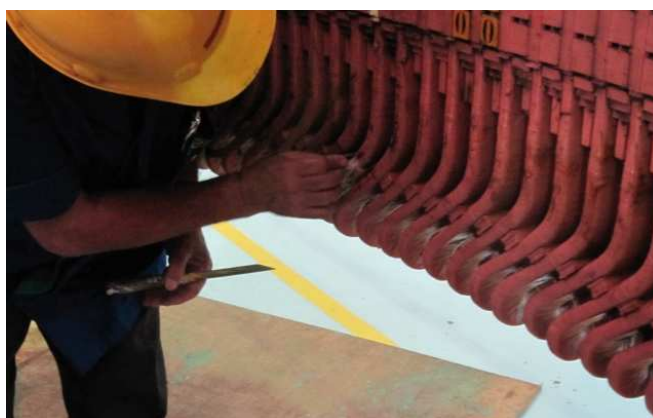


Figura 7.6 – Intervenção nos enrolamentos do estator.

7.3.3. Níveis de Descargas Parciais após a Intervenção

Em junho de 2013, concluiu-se a instalação do sistema de monitoração de descargas parciais, o IMA-DP, na referida unidade geradora, a figura 7.7 apresenta o mapa estatístico após a intervenção nos enrolamentos do estator, observa-se a presença de poucos sinais de DP, verifica-se também que não houve a formação de nenhum padrão de descarga conhecido, como apresentado anteriormente na figura 7.3.

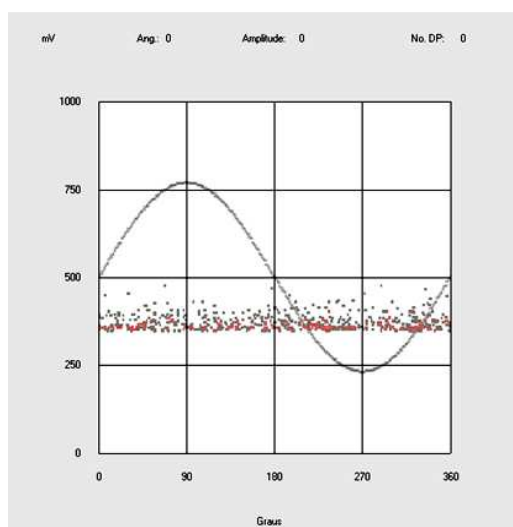


Figura 7.7 – Mapa estatístico após a intervenção nos enrolamentos do estator.

Pode-se afirmar que a monitoração *online* de DP mostrou-se acertiva ao indicar a presença de DP na fase V da Unidade Geradora 3, e após o devido reparo indicar que os níveis de descargas parciais diminuíram naquela fase e ficando uniforme nas três fase.

Ao longo do ano de 2014, foi possível verificar que nesses meses de monitoração ininterrupta não houve grande evolução das DP, quando as máquinas estão operando adequadamente. Porém observou-se que quando houve um aumento na potência nominal gerada (acima de 1 pu), as máquinas apresentaram um aumento significativo nos seus níveis de DP. Notou-se que as DP possuem relação com a condição operacional da máquina. As descargas acompanham as alterações de potência e temperatura sofridas pela mesma, também percebeu-se, através deste estudo, que o aumento das DP teve uma forte correlação com o aumento das vibrações mecânicas, o que será comprovado neste capítulo, através das curvas de tendências obtidas pelos sistemas de monitoramento [101, 102,103].

7.4. CORRELAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE DP E VIBRAÇÕES MECÂNICAS.

Em [95] realizou-se um teste de envelhecimento acelerado de uma bobina, esta bobina foi colocada em um modelo de ranhura e fixada rigidamente em cunhas de entalhe. Em seguida, foi submetida a um sistema de vibração contínua por 90 dias e aplicação de

diferentes tensões. A tabela 7.1 a seguir demonstra os resultados obtidos quanto às descargas parciais:

Tabela 7.1 – Valores Máximos de pico das PDs [95]

Tensão Aplicada (Kv) Tempo de envelhecimento (dia)	1	3,5	5	7
0	0	0	0,53	0,96
30	0	0,44	0,71	0,91
60	0	0,69	1,11	1,40
90	0	0,89	1,44	1,51

Neste teste de envelhecimento acelerado da barra do estator, que teve duração de 90 dias, os resultados das medições de DP mostraram que a amplitude dos pulsos de DP aumentou durante o processo de envelhecimento e obteve o máximo valor de DP após 90 dias de envelhecimento, devido a degradação do enrolamento do estator provocado pelo estresse de vibração da barra, provando assim, a correlação das vibrações com as DP.

No caso da UHCN, podemos observar a correlação de DP e vibrações mecânicas em condições reais de funcionamento. Para uma dada condição operacional, da unidade CNUGH-02, em que aumentou-se a potência nominal gerada em 3,75%, de 24 MW para 24,9MW, analisou-se as curvas de tendências dos sistemas de monitoramento, podendo-se observar que o aumento de potência gerada em 3,75% foi suficiente para quase dobrar o nível de DP na fase A e aumentar nas demais fases, aumentar a vibração relativa no mancal guia da turbina em 19%, a vibração no mancal guia do gerador também aumentou, porém de forma menos significativa. Outras variáveis também foram observadas como temperatura do estator, com cerca de 4% de aumento. Pode-se observar o mesmo comportamento na CNUGH-01, porém com menor intensidade do nível de DP, mas com o mesmo comportamento.

A figura 7.8 apresenta a curva de tendência das Descargas Parciais da Máquina 2, fase A, ao longo do dia 30/06/2014. É possível verificar que ocorreu um aumento nos níveis das descargas parciais no período das 15:00 h às 22:00 h, e, após uma análise deste caso, observando as condições operacionais da máquina, pode-se concluir que esta ocorrência resultou do aumento de 3,75% da potência nominal gerada pela Máquina, passando de 24 MW para 24,9MW, ver Figura 7.9.

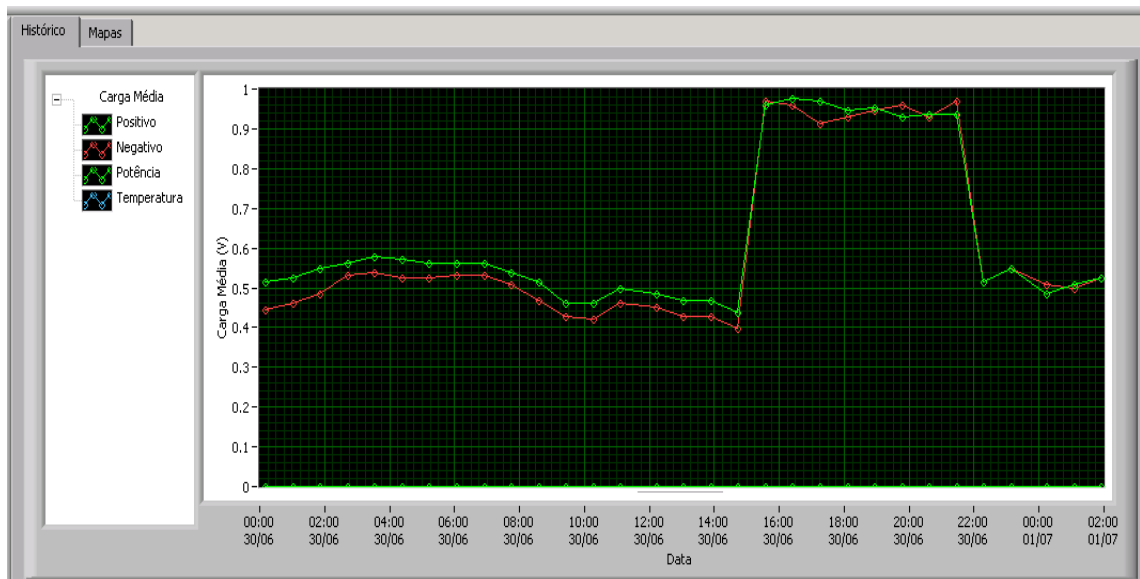


Figura 7.8 – Curva de tendência das Descargas Parciais CNUGH-02

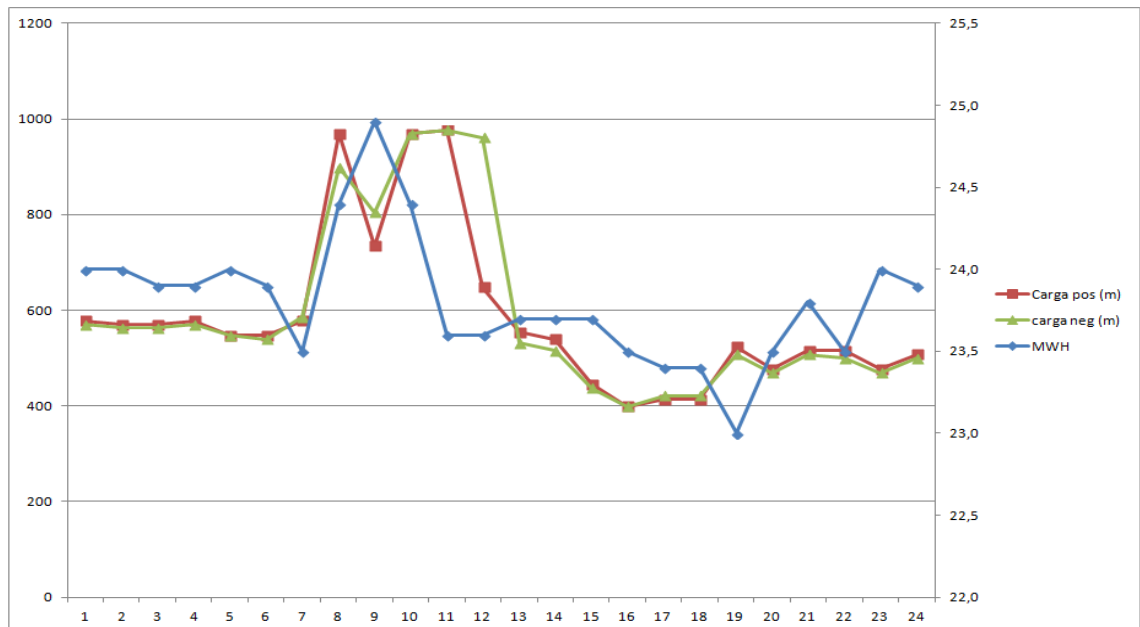


Figura 7.9 – Potência Nominal Gerada x Curva de Tendência das DP

Após uma análise dos sistemas de monitoramento, verificou-se que além do aumento do nível de DP na fase A, houve o aumento da vibração relativa no mancal guia da turbina em 19% (Figura 7.10), a vibração no mancal guia do gerador também aumentou, porém de forma menos significativa. Outras variáveis também foram observadas como temperatura do estator, cerca de 4% de aumento (Figura 7.11).

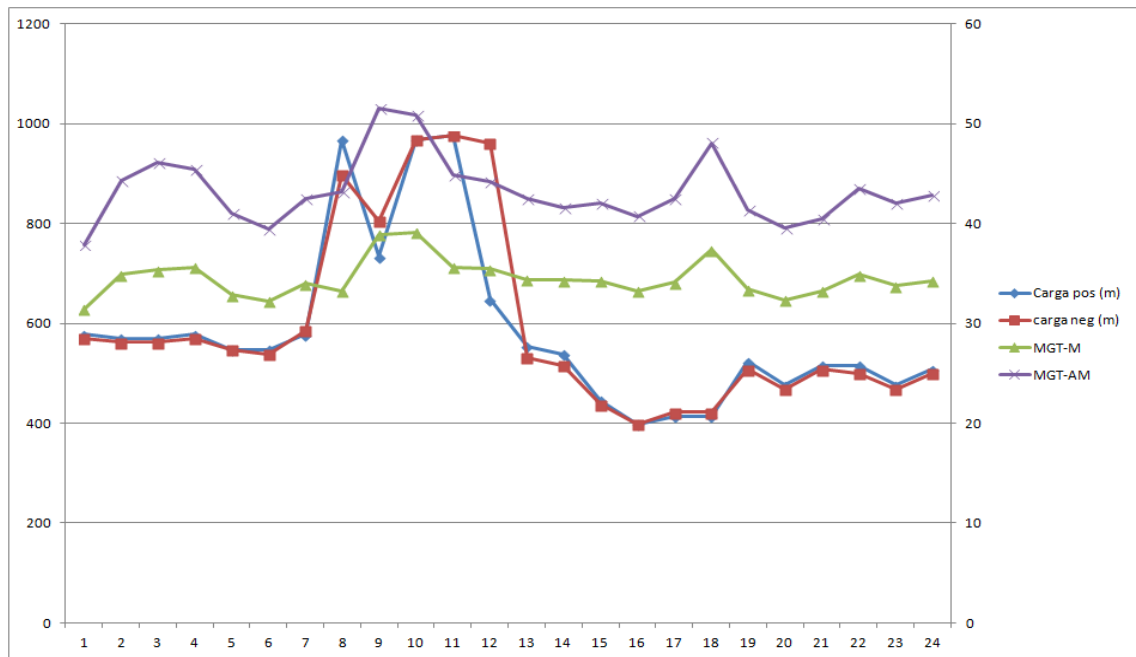


Figura 7.10 – Vibração no Mancal Guia da Turbina x Curva de Tendência das DP

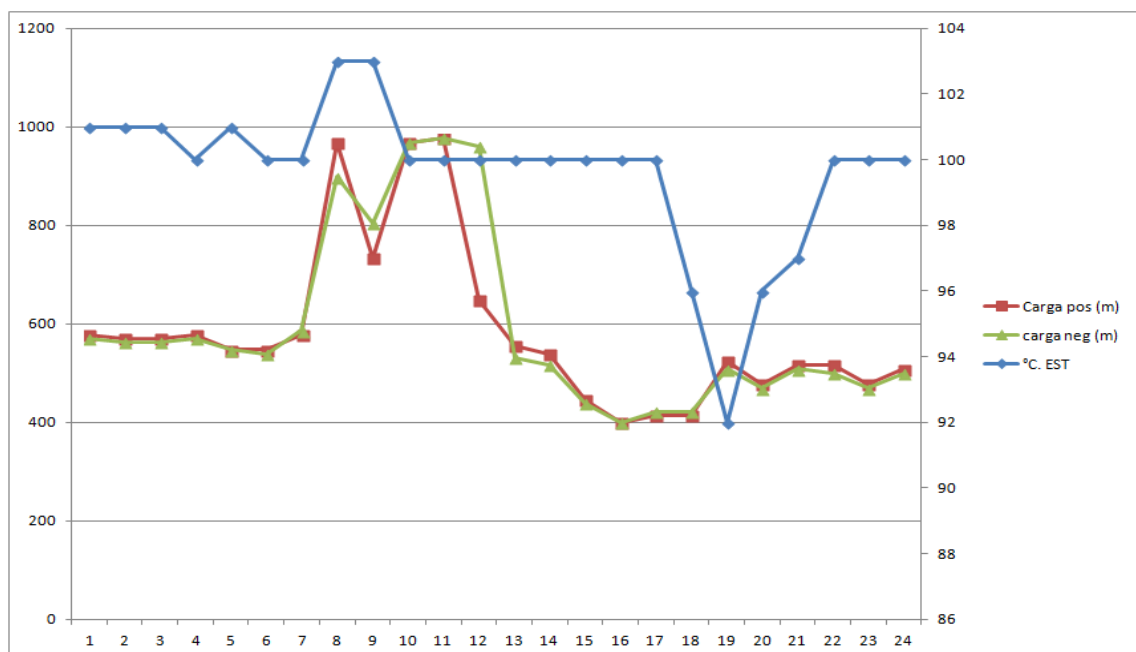


Figura 7.11 – Temperatura do Estator x Curva de Tendência das DP

Por fim, pode-se concluir com este estudo que a magnitude das DP, assim como seu número de ocorrências, e consequentemente seu padrão apresentaram uma correlação positiva com o aumento das vibrações mecânicas, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da máquina. Vale ressaltar que na literatura recente já existe relatos da relação entre vibrações mecânicas e descargas parciais [95].

7.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como objetivo geral apresentar os principais resultados da monitoração *online* de descargas parciais instalada na Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes no Estado do Amapá. Desde 2009 vem se trabalhando no sentido de se implantar a monitoração de DP nas unidades geradoras desta usina, os primeiros trabalhos tiveram início através de medições esporádicas realizadas em conjunto com Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobrás Cepel até a instalação definitiva em todas as máquinas, em 2013, de todo o sistema de monitoração de DP, ou seja, acopladores capacitivos, cabos coaxiais, impedância de medição e computador industrial, o software utilizado para medição foi o IMA-DP, desenvolvido em parceria Eletronorte e Cepel.

Durante uma dessas medições esporádicas, em maio de 2009, constatou-se que a fase V da Unidade Geradora 3 apresentava sinais distintos das demais fases e com indícios de DP. Foi realizada uma inspeção das bobinas do estator em que foram identificados pontos de deterioração da superfície das barras na posição entre barra de frente e barra de fundo, na parte inferior do núcleo magnético. Provavelmente em consequência de efeito corona e possíveis DP. Após o devido reparo no estator, realizado pelo fabricante, o sistema de medição constatou que os níveis de DP estão dentro dos valores aceitáveis e uniformes nas três fases.

Pode-se concluir que a monitoração *online* de DP mostrou-se acertiva ao indicar a presença de DP na fase V da Unidade Geradora 3, e após o devido reparo indicar que os níveis de descargas parciais diminuíram naquela fase e permaneceu uniforme nas três fase.

Por fim, observou-se que as descargas parciais além de estarem relacionadas com a potência nominal e temperatura do gerador também apresentam correlação com nível de vibração da máquina, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da máquina.

8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A manutenção tem uma importância vital no funcionamento de uma empresa e cabe a ela zelar pela conservação desta, especialmente de máquinas e equipamentos, devendo antecipar-se aos problemas através de um contínuo serviço de observação dos bens a serem mantidos. A escolha da técnica de manutenção mais adequada para cada tipo de equipamento de uma planta de geração de energia elétrica, deve levar em consideração fatores como: importância do equipamento para o processo produtivo, o seu custo de aquisição e a sua taxa de falha [109].

A atividade de manutenção deve integrar-se de maneira eficaz ao processo, contribuindo efetivamente para que a concessionária caminhe rumo à sua excelência. Devido aos grandes avanços tecnológicos, ocorre uma grande mudança de paradigma, em que a escolha do tipo de manutenção que será utilizado em determinado equipamento, requer não apenas a eficiência, como a eficácia, ou seja, não basta apenas reparar o equipamento de uma forma “rápida”, tem-se como prioridade, manter a função do equipamento disponível para a operação, reduzindo a probabilidade de uma parada. [110]

A manutenção preventiva baseia-se em estatísticas sobre tempo médio entre as falhas, para assim intervir. O problema é que o tempo médio pode não ser sempre assertivo, resultando em uma manutenção para um reparo desnecessário ou manutenção de uma falha catastrófica, e, então, necessitaria de técnicas corretivas, que segundo [111] implica altos custos, pois as quebras inesperadas podem acarretar perdas de produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção, assim como, pode ocasionar graves consequências para os equipamentos. Por isso, cada vez mais, percebe-se a preocupação das empresas do setor elétrico brasileiro em implementar a manutenção preditiva, onde é possível, a partir da análise de parâmetros, intervir antes da falha catastrófica, visando sempre, menos prejuízo.

Os hidrogeradores podem desenvolver falhas ou defeitos a partir do seu uso, ocasionando sua parada ou uma diminuição da sua eficiência. Pode-se perceber indícios de defeitos por meio de mudança de sinais de vibrações, variação da temperatura, mudança dos sinais de DP, etc. Esta detecção de falhas ou defeitos, é possível por meio de técnicas de manutenção preditiva [112].

Em [110] define-se manutenção preditiva como *“qualquer atividade de monitoramento que seja capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências,*

emissão de diagnóstico e a tomada de decisão”, e é com essa visão que a Análise de DP deve ser aplicada.

Dessa forma, a avaliação do estado operativo do enrolamento estatórico, através do Sistema de Medição de DP *on line* proposto nesta tese, requereu um trabalho extenso envolvendo várias etapas: estudo da propagação dos sinais de DP em barras, desenvolvimento de sensores eletromagnéticos capazes de detectar os sinais de descargas parciais, método de localização de DP, circuito de medição, aquisição de dados, processamento, análise e diagnóstico.

Foi aperfeiçoado e validado experimentalmente um sensor eletromagnético acoplador direcional de microfita de baixo custo e mais eficiente para medição de descargas parciais nos enrolamentos do estator de hidrogeradores. Para atingir o objetivo proposto, foi montado em laboratório um arranjo experimental para o estudo das técnicas de medição de descargas parciais em bobinas estatóricas utilizando sensores convencionais e eletromagnéticos como antenas e o acoplador direcional de microfita.

Observou-se que os resultados obtidos em laboratório mostraram que a medição de descargas parciais através do sensor direcional de microfita pode ser realizada de forma satisfatória na avaliação da condição operacional dos enrolamentos do estator de hidrogeradores, sem perda significativa de informação e com ganho de sensibilidade na quantificação do fenômeno.

Ao estudar a propagação do sinal em uma barra estatórica foi possível desenvolver uma nova metodologia para localização de descargas parciais, baseada em análise espectral. O método FDTD foi utilizado para realizar as simulações e a modelagem eletromagnética do problema. Realizou-se a localização de múltiplas descargas parciais ocorrendo em uma única bobina do hidrogerador e em duas bobinas adjacentes interligadas. Em síntese, a técnica é baseada na determinação das frequências nas quais máximos e mínimos ocorrem no espectro do sinal transitório registrado pelo sensor. Com essas informações, um mapa de probabilidades de ocorrência das descargas em função do espaço foi obtido e, com ele, foi possível obter visualmente as regiões nas quais há maior possibilidade de haver problemas na isolação.

A implementação do simulador virtual de descargas parciais decorreu da necessidade de se ter exemplos de sinais, que mesmo não sendo muito representativos de DP reais, permitissem testar algumas técnicas simples de identificação de pico. Esses valores de pico são fundamentais para se traçar os gráficos conhecidos como PMA e PPA.

Para interpretar os sinais provenientes dos sensores é necessário um sistema que processe este sinal específico. No trabalho foram utilizados vários sistemas de medição: IMA-DP (CEPEL), MPD 600 de fabricação Omicron e também foi desenvolvido o SimDP.

Pode-se afirmar que a monitoração *online* de DP mostrou-se assertiva ao indicar a presença de DP na fase V da Unidade Geradora 3, e após o devido reparo indicar que os níveis de descargas parciais diminuíram naquela fase e ficaram uniformes nas três fases.

Por fim, observou-se que as descargas parciais além de estarem relacionadas com a potência nominal e temperatura do gerador também apresentam correlação com nível de vibração da máquina, fato este que deve ser levado em consideração durante a análise do especialista para o melhor diagnóstico da máquina.

Destarte, os resultados aqui apresentados têm sido aprimorados em laboratório e em campo produzindo novos resultados como: implementação de novos ensaios em laboratório como envelhecimento acelerado de barras, novos sensores não invasivos como antenas (*loop*, dipolo e espiral) capazes de medir descargas parciais a uma certa distância e novas técnicas empregadas na análise e diagnóstico dos fenômenos relacionados com DP que serão apresentadas em trabalhos futuros.

TRABALHOS PUBLICADOS

1 - VILHENA, P. R. M.; DMITRIEV, V.; BRASIL F. de S. Sistemas De Monitoramento On-Line de Descargas Parciais, da Isolação dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores, de Grande Porte: Uma Visão Geral Do Estado Atual. In: XXII SNPTEE, 2013, Brasília. Grupo de Estudo Geração Hidraulica - GGH, 2013.

2 - MODESTO, J. F. M.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M. S.; DMITRIEV, V.; VILHENA, P. R. M. Localização de Múltiplas Descargas Parciais em Bobinas de Hidrogerador. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília/DF. XXII SNPTEE, 2013.

3 - VILHENA, P. R. M. de; MODESTO, J. F. M.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S.; DMITRIEV, V. Localization of partial discharges in stator dielectric regions of a coil of hydrogenerator. In: Colloquium on Large Electrical Machines and Renewable Generation, Bucharest, Romania, 2013.

4 - BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M.; DMITRIEV, V. Estudo de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores. In: V Simpósio

Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2014, Foz do Iguaçu. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2014.

5 - VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S.; DMITRIEV, V.; MODESTO, J. F. M. Estudo Experimental de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos do Estator de Hidrogeradores - Validação de um Novo Sensor do Tipo *Stator Slot Coupler*. In: XIII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2014, Foz do Iguaçu, 2014.

6 - VILHENA, P. R. M.; MODESTO, J. F. M.; DE OLIVEIRA, R.M.S.; BRASIL F. de S.; DMITRIEV, V. Validação do Método das Diferenças no Domínio do Tempo (FDTD) para Análise de Propagação de Descargas Parciais de um Estator. In: VI Enam - Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2014, Taubaté - SP. CE A1 Máquinas Rotativas do Cigré - Brasil, em parceria com o CE D1, Comitê de Estudos de Materiais e Tecnologias Emergentes de Ensaaios, 2014.

7 - BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M. Avaliação da Isolação dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores através da Monitoração On-Line de Descargas Parciais. In: VI Enam - Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2014, Taubaté - SP. CE A1 Máquinas Rotativas do Cigré - Brasil, em parceria com o CE D1, Comitê de Estudos de Materiais e Tecnologias Emergentes de Ensaaios, 2014.

8 - BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M.; CARVALHO, D. S.; CARVALHO, A. T.; AMORIM JUNIOR, H. de P. Experiência na Monitoração On-Line de Descargas Parciais para Avaliação da Isolação Elétrica dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores. In: XVI Eriac Decimosexto Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, 2015, Puerto Iguazú. Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas, v. A1-08, 2015.

9 - ZAMPOLO, R. F.; VILHENA, P. R. M.; SENA, A. J. C.; BRASIL F. de S.; DMITRIEV, V.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S. Estratégia para Seleção de Sub-Bandas *Wavelet* em Sistemas de Monitoramento de Descargas Parciais. In: XVI ERIAC, Puerto Iguazú. A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas, 2015.

10 - VILHENA, P. R. M.; SENA, A. J. C.; ZAMPOLO, R. F.; BRASIL F. de S.; DMITRIEV, V.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S. Simulador Virtual de Sinais de Descargas Parciais. In: XVI ERIAC Decimosexto Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, 2015, Puerto Iguazú. Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas, v. A1-12, 2015.

11 - VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; SANTOS, C. J. S. Correlação das Medições de Descargas Parciais e Vibrações Mecânicas para uma Dada Condição Operacional de Hidrogeradores. In: XXIII SNPTTE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo Geração Hidraulica - GGH, 2015;

12 - VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; SANTOS, C. J. S.; SANTOS, M. N. N. Análise do Sistema de Isolamento dos Enrolamentos Estatóricos das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes, 2015, São José dos Campos. The XI Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015, 2015.

13 - DMITRIEV, V.; DE OLIVEIRA, R. M. S.; BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M.; MODESTO, J. F. M.; ZAMPOLO, R. F. Analysis and Comparison of Sensors for Measurements of Partial Discharges in Hydrogenerator Stator Windings. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, AoP 197, Vol. 14, No.2, December, 2015.

14 - DE OLIVEIRA, R. M. S.; MODESTO, J. F. M.; DMITRIEV, V.; BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M. Spectral Method for Localization of Multiple Partial Discharges in Dielectric Insulation of Hydro-Generator Coils: Simulations and Experimental Results. Dyna. Observação: aguardando resultado da segunda revisão.

15 - DMITRIEV, V.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S.; MODESTO, J. F. M.; VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S. Método de Localização de Descargas Parciais em Hidrogeradores. 2015, Brasil.

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020150041314, data de depósito: 26/02/2015, título: "Método de Localização de Descargas Parciais em Hidrogeradores", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Instituição(ões) financiadora(s): ELETROBRÁS ELETRONORTE.

APÊNDICE A - ANÁLISE NUMÉRICA DO ACOPLADOR DIRECIONAL DE MICROFITA

O acoplador direcional foi projetado com as seguintes dimensões: 10 cm de comprimento, 2 cm de largura e 1,5 mm de espessura. A fita do acoplador possui 9 cm de comprimento e 4 mm de largura. Este acoplador possui um conector SMA para ser realizada a conexão com o osciloscópio e uma resistência de $50\ \Omega$ entre a fita e o plano de terra, para reduzir reflexões. O material dielétrico é o *duroid*, o fenolite também pode ser utilizado. A figura A.1 mostra o acoplador direcional. O condutor central do conector atravessa a placa e é soldado na fita (pelo lado oposto) e o corpo externo do conector é soldado no plano de terra. O objetivo de utilizar-se o acoplador é registrar os sinais sem acoplamento por condução elétrica, mas apenas por campo eletromagnético e, principalmente, reduzir interferências causadas por fontes de campo electromagnético externo.

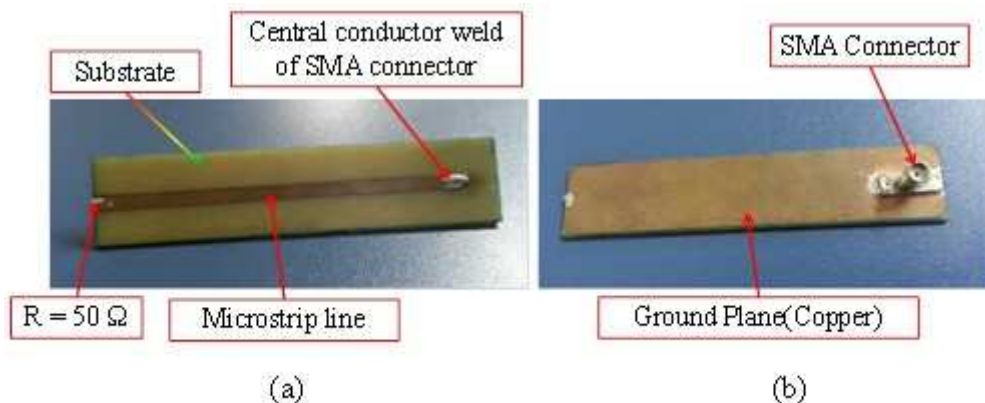


Figura A.1 – Acoplador utilizado para captar descargas parciais na bobina: a) vista frontal (fita), b) vista traseira (plano de terra).

A perda de retorno medida experimentalmente do acoplador é mostrado na figura A.2. Pode-se observar que a primeira ressonância ocorre em aproximadamente 547 MHz. No que diz respeito a permissividade relativa do substrato é cerca de 2,2, um comprimento de onda de aproximadamente 37 cm é obtido. Note-se que o comprimento de onda calculado é cerca de quatro vezes o comprimento do acoplador, como previsto em [113]. Além disso, como descrito em [114], todas as outras ressonâncias podem ser calculadas multiplicando-se a frequência de ressonância do primeiro por um número inteiro ímpar. Esta característica pode também ser vista na figura A.2.

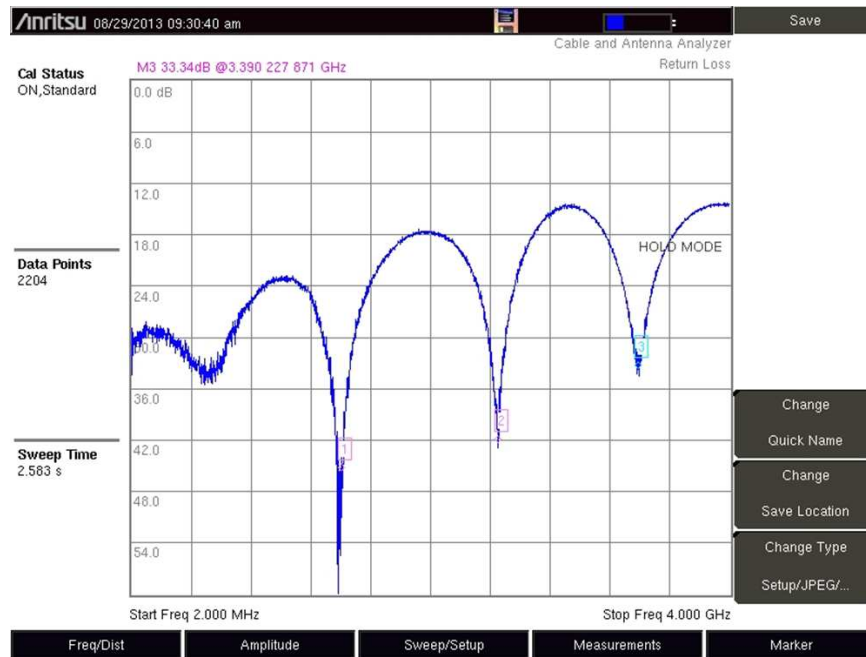
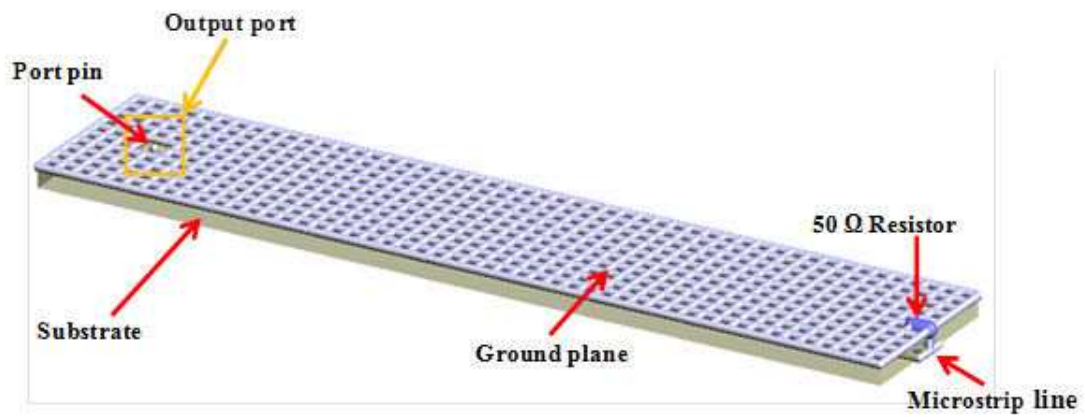


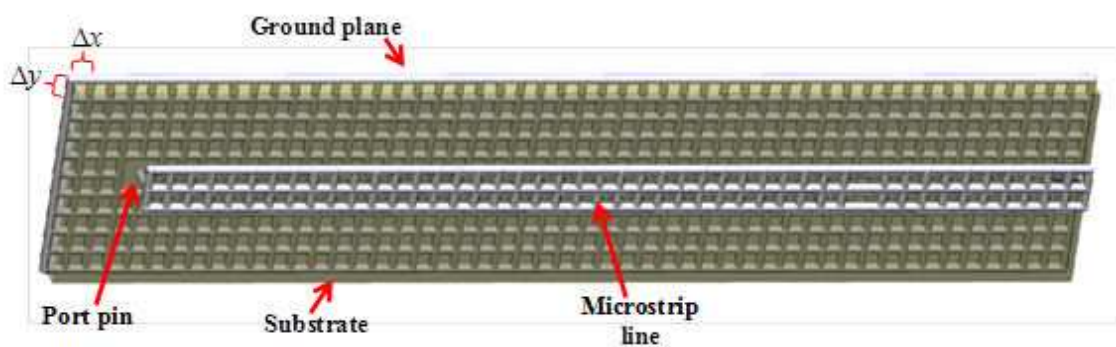
Figura A.2 – Perda de retorno do Acoplador

A fim de validar os resultados na figura A.3 foi elaborado um modelo numérico no software SAGS do acoplador direcional, ver figura 4. Algumas aproximações nas dimensões geométricas do mesmo foram realizadas no modelo numérico, uma vez que algumas dimensões não puderam ser representadas. Para reduzir o uso de memória, utilizou-se a aresta da célula de Yee do modelo $\Delta = 2$ mm. Isto viabilizou simular a barra juntamente com o acoplador.

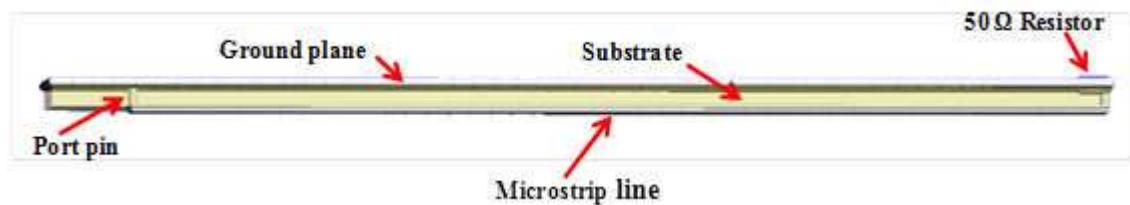
As simulações foram executadas em um cluster Beowulf [115] com 16 computadores Quadcore (foram utilizados 64 núcleos de processamento). O modelo numérico do acoplador é de 10 cm de comprimento, com 2 cm de largura e o substrato dielétrico (*duroid*) tem os seguintes parâmetros [116]: $\epsilon_r = 2.2$, $\sigma = 1.0 \times 10^{-9}$ S/m, $\mu_r = 1$ e rigidez dielétrica de 11,2 kV / mm. A fita do acoplador possui 9 centímetros de comprimento e quatro milímetros de largura. O pino estende-se desde a porta de saída para a faixa de porta de ligação do acoplador, tal como indicado na figura A.3. O sinal de saída do acoplador é a tensão induzida entre o pino da porta e o plano de terra. Note-se que, utilizando o método descrito em [117], obtém-se a impedância do acoplador de aproximadamente 54 Ω .



(a)



(b)



(c)

Figura A.3 – Modelo FDTD do acoplador direcional como visto no SAGS: (a) vista de cima, (b) vista inferior e (c) de visão lateral

A perda de retorno do acoplador foi calculada numericamente através do método FDTD e medidos experimentalmente (figura A.4). Note-se que é abaixo de -14 dB, de ~ 100 Hz a 2 GHz. Pode-se ver uma boa concordância entre as medições e os resultados da simulação FDTD.

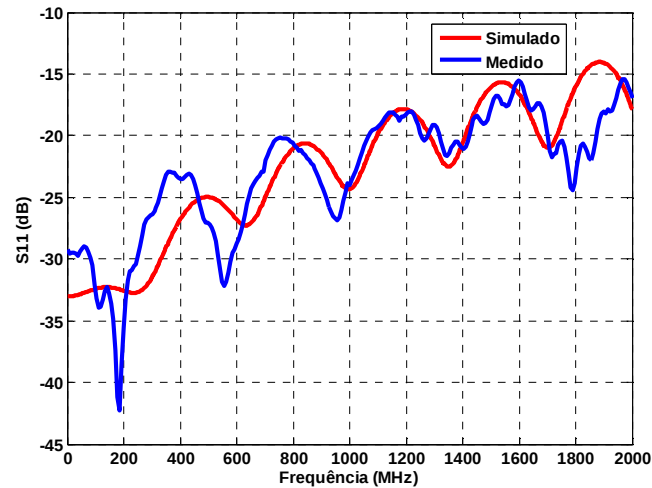


Figura A.4 – Perdas de retorno (S_{11}) simulada (FDTD) e medida do acoplador direcional de microfita.

Para a verificação de consistência física dos resultados obtidos com o acoplador direcional inserido na barra de $3.5 \times 0.066 \times 0.022$ m, a simulação realizada para validar o software SAGS é repetida. No entanto, para a presente simulação, o modelo numérico FDTD do acoplador direcional é colocada sobre a estrutura, como ilustrado pela figura A.5, inserção 1. As inserções 2 e 3 na figura A.5 mostram a porta de excitação, o qual foi concebido para assegurar impedância entre o núcleo metálico do barra e a fonte de tensão de excitação. Observe que o sistema de aterramento de eletrodos foi modelado por penetrar parte da estrutura metálica no solo condutor com os parâmetros $\epsilon_r = 10$ e $\sigma = 10$ S/m. De modo a representar o aterramento como um meio semi-infinito, o modelo de solo penetra nas paredes CPML (*Convolutional Perfect Matched Layer*) e as ondas são absorvidas. Reflexões são evitadas, garantindo impedância entre CPML e o solo e entre CPML e espaço livre [82] [118]. O resistor das inserções de 2 e 3 da figura A.5 executa a mesma função do que na figura 4.8 (b) [83] (observar que os dois são inseridos no mesmo local). A inserção 4, na figura A.4 mostra a porta de saída. A tensão de saída é calculada entre o eletrodo ligado à terra e o condutor interno.

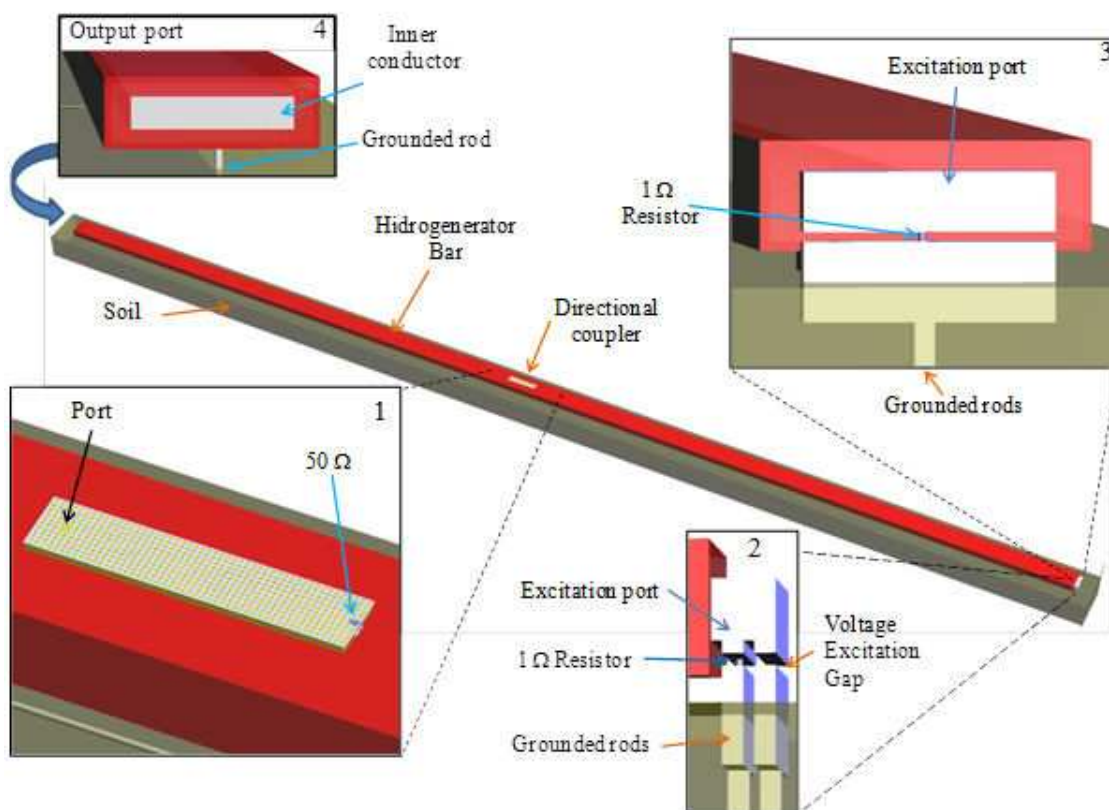


Figura A.5 – Modelo SAGS FDTD do acoplador direcional na barra modelado para validação de medições: inserção 1: o acoplador direcional; inserção 2: porta de excitação e aterramento; inserção 3: porta de excitação (vista frontal); inserção 4: porta de saída [83].

O sinal (normalizado) obtido no conector do acoplador é mostrado na figura A.6. A forma do sinal é muito semelhante a do sinal derivado no tempo da figura 4.9, o qual é obtido a porta de saída (inserção de 4, figura A.5). Este efeito é esperado porque o acoplador é muito menor do que o comprimento de onda ($\lambda_{\min} \approx 38\text{m}$) do sinal mínimo [117]. É interessante notar que as oscilações visto nas figuras A.6 e 4.9 são causadas por reflexões nas extremidades da barra (cada pico é registrado após a onda propagada através do comprimento da barra duas vezes), a produção de ressonância específica. Em comparação com o sinal da porta de saída de barra, é observada uma redução significativa do nível de sinal registrado pelo acoplador direcional. É principalmente uma consequência do efeito de blindagem causada pelo revestimento de barra metálica (figura 4.8), sobre a qual é colocado o acoplador. Fator de acoplamento entre o acoplador direcional e a barra Roebel e uma discussão sobre a sua diretividade são apresentados em [119].

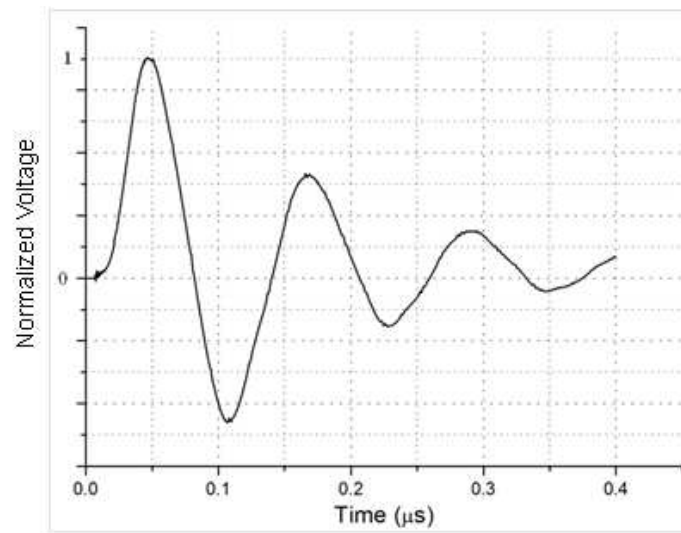


Figura A.6 – Sinal induzido no acoplador direcional, obtido numericamente através da modelagem da barra com o sensor

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] STONE, G.; WARREN, V. Differences in Stator Winding Partial Discharge Activity Between Manufacturers. Iris Power Engineering, 1 Westside Drive, Unit 2 Toronto, Ontario, Canada M9C 1B2, 2005.
- [2] IEC/TS 60034-27-2, TECHNICAL SPECIFICATION, Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, Edition 1.0, march, 2012.
- [3] BELEC, M. HUDON, C.; NGUYEN D. Statistical analysis of partial discharge data, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006.
- [4] STONE, G. C. Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 12, no. 5, p. 891-903, 2005.
- [5] www.irispower.com
- [6] www.pd-systems.com
- [7] www.adwel.com
- [8] R. Bartnikas. Partial Discharges. Their Mechanism, Detection, and Measurement, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 9 , p. 763-808, 2002.
- [9] BRASIL, F. de S. Medição de descargas parciais em buchas capacitivas em ambiente a céu aberto, uma experiência bem sucedida, XXI SNPTEE, Florianópolis – SC, out. 23 a 26, 2011.
- [10] www.fluke.com
- [11] BARTNIKAS, R.; LEVI, J. A Simple Pulse Height Analyzer for PD Rate Measurements, IEEE Trans. IM, p. 341-345, 1969.
- [12] YUAN W.; CHUANGLI G.; ZHIPENG W.; PENGCHENG D. High reliable partial discharge *online* monitoring system of hidrogenerator, International conference on measuring technology and mechatronics automation, 2011.
- [13] IEC Publication-60270, High-voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurement. Third Edition, 2000.
- [14] GROSS, D. W. Partial Discharge Diagnosis of Motor Defects. Power Diagnostix Systems GmbH Aachen, Germany. Nordic Insulation Symposium Tampere, June 11-13, 2003.

- [15] VILHENA, P. R. M. de; AMORIM JUNIOR, H. de P.; RODRIGUES T. B.; TOMAZ A.; LEVY A.; BRASIL F. de S.; MOREIRA M. Validação do Sistema IMA-DP em Laboratório e na UHE Samuel – ELETRONORTE. XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis – SC, out. 14 a 17, 2011.
- [16] STONE, G. C.; ENGINEERING, I. P. Partial Discharge - Part VII: Practical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 7, no. 4, p. 9-19, 1991.
- [17] YOUN, Y. W.; KANG, D. S.; YI, S. H.; AND SHIN, B. C. “A synthetic noise suppressing algorithm for partial discharge signals of generators,” *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, p. 1-5, Oct. 2009.
- [18] CHO, S. I. On-Line PD (Partial Discharge) Monitoring of Power System Components, Alto Univerity, Master Dissertation, p.135, 2011.
- [19] SOARES, W. C.; VIEIRA FILHO, J.; DUARTE, M. A. Q.; VILLARREAL, F. Análise de Métodos de Redução de Ruído por Limiar no Domínio Wavelet, *TEMA Tend. Mat. Apl. Comput.*, vol. 9, no. 3, p. 471-480, 2008.
- [20] BARTNIKAS, R.; MCMAHON, E. J. Engineering Dielectrics Volume 1 – Corona Measurement and Interpretation, ASTM Publication STP 669, 1979.
- [21] KREUGER, F.H. Discharge Detection in High Voltage Equipment, Butterworth-Heinemann, 1989.
- [22] KELEN, A. The Functional Testing of HV Generator Stator Insulation, CIGRE, 1976.
- [23] MALLIKARJUNAPPA, K. Removal of Interferences from Partial Discharge Pulses using Wavelet Transform, *TELKOMNIKA*, vol. 9, no. 1, p. 107-114, 2011.
- [24] NAZNEEN, B.; SATISH, L. Wavelet-based Denoising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, no. 2, p. 354-367, 2003.
- [25] OTA, H. Partial discharge signal processing using wavelets, in *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, p. 1260-1266, 2010.
- [26] MA, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. J. Interpretation of Wavelet Analysis and Its Application in Partial Discharge Detection, *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 3, p. 446-457, 2002.
- [27] EVAGOROU, D.; KYPRIANOUT, A.; LEWIN, P. L.; STAVROU, A.; EFTHYMIU, V.; GEORGHIU, G. E. Evaluation of Partial Discharge Denoising using the Wavelet Packets Transform as a Preprocessing Step for Classification, in *Conference on Electrical Dielectric Phenomena*, p. 387-390, 2008.

- [28] CHANG, C. S. *et al.* Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain, IEE Science, Measurements and Technology, vol. 152, no. 3, p. 129-140, 2005.
- [29] PETRARCA, C.; FEDERICO, N.; LUPÒ, G. Wavelet Packet Denoising Partial Discharge Data, in Conference on Electrical Dielectric Phenomena, p. 644-647, 2006.
- [30] ZHOU, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. J. An Improved Methodology for Application of Wavelet Transform to Partial Discharge Measurement Denoising, IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 12, no. 3, p. 586-594, 2005.
- [31] COMMITTEE, T. IEEE Trial-Use Guide for the Detection of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers, 2000.
- [32] MOTA, H. O.; VOLPINI, N. D. O. RODRIGUES, G. F. A real-time processing system for denoising of partial discharge signals using the wavelet transform, in IEEE International Symposium on Electrical Insulation, p. 391-395, 2008.
- [33] SHIM, I.; SORAGHAN, J. J.; SIEW, W. H. Detection of PD Utilizing Part 3: Open-Loop Noise, IEEE Electrical Insulation Magazine, p. 6-13, 2001.
- [34] MORTAZAVI S. H.; SHAHRTASH, S. M. Comparing Denoising Performance of DWT , WPT , SWT and DT-CWT for Partial Discharge Signals, in Universities Power Engineering Conference, p. 1-6, 2008.
- [35] MA, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. J. Interpretation of Wavelet Analysis and Its Application in Partial Discharge Detection, IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 9, no. 3, p. 446-457, 2002.
- [36] MCDERMID, W.; BLACK, T. Tracking stator bar condition by on-line partial discharge measurements, Electrical Insulation conference, Annapolice Maryland, 5-8 June, 2011.
- [37] ROSOLEM J. B.; FLORIDIA C.; SANZ J. P. M. Field and Laboratory Demonstration of a Fiber-Optic/RF Partial Discharges Monitoring System for Hydrogenerators Applications, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, vol. 25, no. 3, 2010.
- [38] KAWAKATSU, W. M.; LEITE, R. C.; SANZ, J. P. M.; Dmitriev V. Antena de Alta Diretividade como Sensor de Descargas Parciais em Barras de Geradores. In: V ENAM- Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, Angra dos Reis, 2012.
- [39] STONE, G. C.; CAMPBELL, S. R. Discussion of Field experiences on the measurement of partial discharges on rotating equipment, IEEE Trans. On Energy conversion, vol. 16, no. 4, p. 380-381, 2001.
- [40] <http://www.nec.com>
- [41] SANG, H.; SHIN; KIM, J. C. A study on partial discharge signals and noises at on-line generator stator windings, IEEE T&D Asia, 2009.

- [42] IEEE Std 1434-2000, IEEE Trial-use guide to the measurement of partial discharges in rotating machinery, 2000.
- [43] CARVALHO, A. T.; AMORIM JUNIOR, H. de P.; LEVY A. Sistema para medição, análise e diagnóstico de descargas parciais - uma proposta de arquitetura econômica versátil e integrada. XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, out. 16 a 21, Curitiba – Paraná – Brasil, 2005.
- [44] Coupler Installation Guide, installation of: capacitive partial discharge couplers CC14B, CC20B and CC20C, rev. 2.12, Power Diagnostix Systems GmbH, 2011.
- [45] SEDDING, H.G.; CAMPBELL, S.R.; STONE, G.C.; KLEMPNER, G. S. A New Sensor For Detecting Partial Discharges In Operating Turbine Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 6, no.4, Ontario Hydro, Toronto, Canada, 1991.
- [46] STONE, G. C.; SEDDING, H. G. and COSTELLO, M. J. Application of Partial Discharge Testing to Motor and Generator Stator Winding Maintenance. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, p. 459-464, 1996.
- [47] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery, USA, 2000.
- [48] SILVA, M.J.; FERREIRA, F.; POMPEU, I.; CORDEIRO, J.F. Desenvolvimento de uma Metodologia de Medição de Descargas Parciais para o Controle de Qualidade de Componentes Elétricos de Máquinas Rotativas. In: III ENAM – Encontro Nacional de Monitoramento, Foz do Iguaçu, Brasil, 2006.
- [49] IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils, IEEE Std 1043-1989, p. 1, 1989.
- [50] MCDERMID, W. ; BROMLEY, J. Partial discharge screening test for internal voids and delaminations in stator coils and bars, Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 14, no. 3, p. 292 –297, 1999.
- [51] BIRLASEKARAN, S. Identification of the type of partial discharges in an operating 16kv/250 mva generator, in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 559 – 562, 2003.
- [52] MORIN, R.; NOVAK, J.; BARTNIKAS, R.; ROSS, R. Analysis of in-service aged stator bars, Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 4, p. 645 –654, 1995.
- [53] WANG, W.; LI, C.; LI, W.; LIU, L.; WANG, Z.; DING, L. Pattern recognition of single and composite partial discharge on generator stators, in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 335–339, 2001.

- [54] HAO, Y.; XIE, H.; WANG, G.; JIA, Z. Assessment of insulation condition of generator stator bars based on velocity of ultrasonic waves, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, vol. 10, no. 3, p. 539 – 547, 2003.
- [55] EMERY, F. Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, vol. 12, no. 2, p. 347 – 361, 2005.
- [56] YUE, B.; CHEN, X.; CHENG, Y.; SONG, J.; XIE, H. Diagnosis of stator winding insulation of large generator based on partial discharge measurement, *Energy Conversion*, IEEE Transactions on, vol. 21, no. 2, p. 387 – 395, june 2006.
- [57] JIA, Z.; PENG, X.; GUAN, Z.; WANG, L.; YUE, B. Evaluation of the degradation of generator stator ground wall insulation under multistresses aging, *Energy Conversion*, IEEE Transactions on, vol. 23, no. 2, p. 474 –483, june 2008.
- [58] YEE, K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 14, p. 302–307, 1966.
- [59] TAFLOVE, A.; HAGNESS, S. C. *Computational Electrodynamics, The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed. plus 0.5em minus 0.4em Artech House Inc., 2005.
- [60] HOSHINO, T.; MARUYAMA, S.; AND SAKAKIBARA, T. Simulation of propagating electromagnetic wave due to partial discharge in gis using fdtd, *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 1, p. 153 –159, jan. 2009.
- [61] ISHAK, A.; JUDD, M.; SIEW, W. A study of uhf partial discharge signal propagation in power transformers using fdtd modelling, in *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 45th International, p. 1 –5, 2010.
- [62] BIN, X.; JUNHAO, L.; WENRONG, S.; AND YANMING, L. Simulating propagation characteristic of uhf signal for pd monitoring in transformers by fdtd technique, in *Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. Asia-Pacific*, p. 1 –4, march 2009.
- [63] POMMERENKE, D.; JOBAVA, R.; AND HEINRICH, R. Numerical simulation of partial discharge propagation in cable joints using the finite difference time domain method, *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, vol. 18, no. 6, p. 6 –11, nov.- dec, 2002.
- [64] REID A.; STEWART, M.; JUDD M. Fdtd modeling of uhf partial discharge sensor response, in *Sustainable Power Generation and Supply. International Conference*, p. 1 – 4, april 2009.
- [65] JOBAVA, R.; POMMERENKE, D.; HEINRICH, R.; KALKNER, W.; GHEONJIAN, A. Simulation of transient field coupling into directional coupler sensors using a 3d fdtd

algorithm in cylindrical coordinates, in Applied Electromagnetism. Proceedings of the Second International Symposium of Trans Black Sea Region, p. 67, 2000.

[66] TIAN, Y.; KAWADA, M.; ISAKA, K. Visualization of electromagnetic waves emitted from multiple pd sources on distribution line by using fdtd method, in Electrical Insulating Materials, (ISEIM 2008). International Symposium, p. 95 –98, sept. 2008.

[67] WENHAO, L.; JUN, C.; MIN, C.; JIANGTAO, Q.; JUNHAO, L.; YANMING, L. Simulation study of e-m wave propagation characteristics in gis model considering isolating switch, in Electrical and Control Engineering (ICECE), International Conference, p. 2557 – 2560, sept. 2011.

[68] XIAO, S.; MOORE, P.; JUDD, M.; AND PORTUGUES, I. An investigation into electromagnetic radiation due to partial discharges in high voltage equipment, in Power Engineering Society General Meeting. IEEE, p. 1 –7, june 2007.

[69] BLOKHINTSEV, I.; GOLOVKOV, M.; GOLUBEV, A.; KANE, C. "Field experiences with the measurement of partial discharges on rotating equipment," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.14, no.4, p.930-938, Dec 1999.

[70] MANGERET, R.; FARENC, J.; AI, B.; DESTUEL, P.; PURETOLAS, D.; CASANOVAS, J. Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber, Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 4, p. 783-789, aug 1991.

[71] ALVES, M. ; MARCUS, ; BRASIL F. de S. ; VILHENA, P. R. M. ; CARVALHO, D. . Caracterização de Padrões de Descargas Parciais em Hidrogeradores Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional. In: XXIII SNPTEE, 2015, Foz do Iguaçu. GGH - Grupo de Geração Hidraulica, 2015.

[72] MCDERMID, W.; BROMLEY, J. Experience with directional couplers for partial discharge measurements on rotating machines in operation, Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 14, no. 2, p. 175-184, jun 1999.

[73] ZHU, H.; GREEN, V.; SASIC, M.; HALLIBURTON, S. Increased sensitivity of capacitive couplers for in-service pd measurement in rotating machines, Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 14, no. 4, p. 1184 –1192, dec 1999.

[74] VEEN J.; WIELLEN, P. V. D. The application of matched filters to pd detection and localization, Electrical Insulation Magazine, IEEE, vol. 19, no. 5, p. 20 – 26, sept.- oct. 2003.

[75] WHALEN, A. Detection of Signals in Noise. plus 0.5em minus 0.4emNew York: Academic Press, 1971.

- [76] KHEIRMAND, A.; LEIJON, M.; AND GUBANSKI, S. Advances in online monitoring and localization of partial discharges in large rotating machines, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 1, p. 53 – 59, march 2004.
- [77] BORGHETTO, J.; CAVALLINI, A.; CONTIN, A.; MONTANARI, G.; DE NIGRIS, M.; PASINI, G.; AND PASSAGLIA, R. Partial discharge inference by an advanced system. analysis of online measurements performed on hydrogenerator, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 2, p. 333 – 339, june 2004.
- [78] TAYLOR, N.; Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency. Tese de Doutorado, School of Electrical Engineering, Suécia, 2010.
- [79] CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, CIGRÉ 392 Survey of Hydrogenerator Failures, Working Group A1.10, 2009.
- [80] STONE, G.C.; SASIC, M.; DUNN, D.; CULBERT, I. Recent Problems Experienced With Motor and Generation Windings, Copyright Material IEEE, No. PCIC-2009-6, 2009.
- [81] SIEMENS, Folha de dados elétricos, U.H.E Coaracy Nunes–Gerador de Polos Salientes 1DH7139-3WF24-Z, 1997.
- [82] OLIVEIRA, R. M. e S. de, Nova metodologia para análise e síntese de sistemas de aterramento complexos utilizando o método LN-FDTD, computação paralela automática e redes neurais artificiais, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará / PPGEE, Fevereiro, 2008.
- [83] LESAIN, O.; LEBEY, T.; DINCULESCU, S.; DEBRUYNE, H.; PETIT, A. Propagation of fast PD signals within stator bars performance and limitations of a high frequency monitoring system, *Properties and Applications of Dielectric Materials. Proceedings of the 7th International Conference*, vol.3, p.1112,1115, 1-5 June, 2003.
- [84] LIU, Z.; BLACKBURN, T. R.; PHUMG, B. T.; JAMES, R. E. Detection of Partial Discharge in Solid and Liquid Insulation with an Electric Field Sensor, *Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, in conjunction with 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation and the 30th Symposium on Electrical Insulating Materials*, Toyohashi, Japan, p. 661-664, sept. 27-30, 1998.
- [85] MODESTO, J. F. M.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M. S.; DMITRIEV, V.; VILHENA, P. R. M. Localização de Múltiplas Descargas Parciais em Bobinas de Hidrogerador. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília/DF. XXII SNPTEE, 2013.

- [86] VILHENA, P. R. M. de; MODESTO, J. F. M.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S.; DMITRIEV, V. Localization of partial discharges in stator dielectric regions of a coil of hydrogenerator. In: Colloquium on Large Electrical Machines and Renewable Generation, Bucharest, Romania, 2013.
- [87] CHAUDHRY, M. A.; JONSCHER. A. K. The dielectric properties of mica paper in variable temperature and humidity, *Journal of Materials Science*, vol 20, no 10, p. 3581-3589, 1985.
- [88] ZAMPOLO, R. F.; VILHENA, P. R. M.; SENA, A. J. C.; BRASIL F. de S.; DMITRIEV, V.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S. Estratégia para Seleção de Sub-Bandas Wavelet em Sistemas de Monitoramento de Descargas Parciais. In: XVI ERIAC, Puerto Iguazú. A1 - Máquinas Elétricas Rotativas, 2015.
- [89] SADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo, 3 ed., Bookman, Porto Alegre, 2004.
- [90] CONTIN, A.; PASTORE, S. Classification and separation of partial discharge signals by means of their auto-correlation function evaluation, *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 6, p.1609 -1622, 2009.
- [91] JAMAL, R. E; PICHLIK, H. LabVIEW applications and solutions, National Instruments. Estados Unidos.
- [92] National Instruments Reference Manual, G programming reference manual, Estados Unidos.
- [93] National Instruments Addendum, LabVIEW Version 7.1 Addendum, Estados Unidos.
- [94] DA SILVA, J. A., SIMME: GUIA DO USUÁRIO, CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A.
- [95] PENG, X., JIA Z., GAO S., WANG L., GUAN Z., "Study on Stator Winding Degradation under Bar Vibration", *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, City of Beijing, China, 2009.
- [96] VILHENA, P. R. M.; MODESTO, J. F. M.; DE OLIVEIRA, R.M.S.; BRASIL F. de S.; DMITRIEV, V. Validação do Método das Diferenças no Domínio do Tempo (FDTD) para Análise de Propagação de Descargas Parciais de um Estator. In: VI Enam - Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2014, Taubaté - SP. CE A1 Máquinas Rotativas do Cigré - Brasil, em parceria com o CE D1, Comitê de Estudos de Materiais e Tecnologias Emergentes de Ensaio, 2014.

- [97] BRASIL F. de S. VILHENA, P. R. M. Avaliação da Isolação dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores através da Monitoração On-Line de Descargas Parciais. In: VI Enam - Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2014, Taubaté - SP. CE A1 Máquinas Rotativas do Cigré - Brasil, em parceria com o CE D1, Comitê de Estudos de Materiais e Tecnologias Emergentes de Ensaio, 2014.
- [98] VILHENA, P. R. M.; DMITRIEV, V.; BRASIL F. de S. Sistemas De Monitoramento On-Line de Descargas Parciais, da Isolação dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores, de Grande Porte: Uma Visão Geral Do Estado Atual. In: XXII SNPTEE, 2013, Brasília. Grupo de Estudo Geração Hidraulica - GGH, 2013.
- [99] BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M.; DMITRIEV, V. Estudo de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores. In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2014, Foz do Iguaçu. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2014.
- [100] VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S.; DMITRIEV, V.; MODESTO, J. F. M. Estudo Experimental de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos do Estator de Hidrogeradores - Validação de um Novo Sensor do Tipo *Stator Slot Coupler*. In: XIII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2014, Foz do Iguaçu, 2014.
- [101] BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M.; CARVALHO, D. S.; CARVALHO, A. T.; AMORIM JUNIOR, H. de P. Experiência na Monitoração On-Line de Descargas Parciais para Avaliação da Isolação Elétrica dos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores. In: XVI ERIAC DECIMOSEXTO ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 2015, Puerto Iguazú. Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas, v. A1-08, 2015.
- [102] VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; SANTOS, C. J. S. Correlação das Medições de Descargas Parciais e Vibrações Mecânicas para uma Dada Condição Operacional de Hidrogeradores. In: XXIII SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, GRUPO DE ESTUDO GERAÇÃO HIDRAULICA - GGH, 2015;
- [103] VILHENA, P. R. M.; BRASIL F. de S.; SANTOS, C. J. S.; SANTOS, M. N. N. Análise do Sistema de Isolamento dos Enrolamentos Estatóricos das Unidades Geradoras da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2015, São José dos Campos. THE XI LATIN-AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2015, 2015.

- [104] CARVALHO, A. T.; AMORIM JUNIOR, H. de P.; PARDAUIL, A. C. N.; CARVALHO, D. S.; BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M. Sistema de Monitoramento Intensivo de Descargas Parciais em Hidrogeradores. In: XVI ERIAC, 2015, Puerto Iguazú. Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas, 2015.
- [105] CARVALHO, A. T.; AMORIM JUNIOR, H. de P.; PARDAUIL, A. C. N.; CARVALHO, D. S.; BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M. Experience with an Intensive Partial Discharge Monitoring System for Rotating Electrical Machines. In: Rotating Electrical Machines: Requirements, Operation & Maintenance, 2015, Madrid. Meeting and Colloquium "Rotating Electrical Machines: Requirements, Operation & Maintenance", 2015.
- [106] VILHENA, P. R. M.; SENA, A. J. C.; ZAMPOLO, R. F.; BRASIL F. de S.; DMITRIEV, V.; DE OLIVEIRA, RODRIGO M.S. Simulador Virtual de Sinais de Descargas Parciais. In: XVI ERIAC DECIMOSEXTO ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 2015, Puerto Iguazú. Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas, v. A1-12, 2015.
- [107] IRIS POWER ENGINEERING, "PD Seminar – Volume 1", version 4.2, Toronto, Canada, 2004.
- [108] BARTINIKAS, R., "Corona Discharges Processes in Voids". In: BARTINIKAS, R., MACMAHON, E.J., Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation Vol. I, Chapter 2, Philadelphia, ASTM, pp. 22-67, 1979.
- [109] NEPOMUCENO, L. X., 'Técnicas de Manutenção Preditiva', Editora Edgard Blücher Ltda; Volume 2, 1989.
- [110] BARONI, Tarcísio *et al* ., Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, Ed. Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.
- [111] PINTO, A. K.; XAVIER, J.A.N.; "Manutenção: função estratégica", 2.Ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- [112] R. L. Da S. SANTOS, R. C. L. de OLIVEIRA, J. C. LEITE, "Metodologia de Diagnóstico de Manutenção Baseada em Condição de Enrolamentos Estatóricos em Hidrogeradores", 1º CONEPRO-SUL, Joinville-SC, Brasil, 2010.
- [113] EROGLU, A. and LEE, J. K. "The Complete Design of Microstrip Directional Couplers Using the Synthesis Technique", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 12, December 2008.
- [114] CHENG, H. C. and RAMASWAMY, R. V. "Determination of the coupling length in directional couplers from spectral response", *IEEE Photonics and Technology Letters*, vol. 2, no. 11, Nov. 1990.

- [115] STERLING, T.; D. BECKER, J.; SAVARESE, D.; DORBAND, J. E.; RANAWAKE, U. A. and PACKER, C. E. "Beowulf: A Parallel Work-station for Scientific Computation," in *Proceedings of the International Conference on Parallel Processing 95*, 1995.
- [116] SHEEN, D.M.; ALI, S.M.; ABOUZAHA, M.D.; KONG, Jin-Au. "Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.38, no.7, pp.849, 857, Jul. 1990.
- [117] WEELER, H. A. "Transmission-line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 25, no. 8, pp. 631-647, Aug. 1977.
- [118] RODEN, J.A. and GEDNEY, S. D. "Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, No 5, pp. 334-339, Dec. 2000.
- [119] DMITRIEV, V.; DE OLIVEIRA, R. M. S.; BRASIL F. de S.; VILHENA, P. R. M.; MODESTO, J. F. M.; ZAMPOLO, R. F. Analysis and Comparison of Sensors for Measurements of Partial Discharges in Hydrogenerator Stator Windings. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, AoP 197*, Vol. 14, No.2, December, 2015.