

TESE DE DOUTORADO Nº 274

**LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS DE
TRANSFORMADORES POR MEIO DA ANÁLISE DE PULSOS DE
CORRENTE**

Arismar Moraes Gonçalves Júnior

DATA DA DEFESA: 08/06/2018

Arismar Moraes Gonçalves Júnior

Localização de Descargas Parciais nos Enrolamentos de Transformadores por meio da Análise de Pulsos de Corrente

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Hélder de Paula

Co-orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte
junho de 2018

G635I

Gonçalves Júnior, Arismar Moraes.

Localização de descargas parciais nos enrolamentos de transformadores por meio de análise de pulsos de corrente [manuscrito] / Arismar Moraes Gonçalves Júnior. - 2018.
xix, 145 f., enc.: il.

Orientador: Hélder de Paula.

Coorientador: Wallace do Couto Boaventura

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 139-145.

Bibliografia: f. 123-138.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Descargas elétricas - Teses.
3. Transformadores elétricos - Teses. I. Paula, Hélder de. II. Boaventura, Wallace do Couto. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

*À minha amada esposa, Patrícia.
Aos meus queridos pais, Arismar e Maria Célia.*

Agradecimentos

A DEUS, por sempre me guiar às melhores direções, me mantendo persistente e saudável, mesmo diante de toda minha inquietude.

À minha esposa Patrícia, eterna namorada, por todo amor e companherismo.

Aos meus pais, Arismar e Maria Célia, fonte de sabedoria, inspiração, honestidade e humildade. Obrigado pela excelente educação administrada na criação de seus filhos e por não medirem esforços para o estudo dos mesmos.

Aos meus queridos irmãos, Mateus e Ana Flávia, por todo carinho e diversão nos momentos de encontro.

Aos professores Hélder e Wallace, amigos além de orientadores acadêmicos, por todo suporte, dedicação e paciência no desenvolvimento deste trabalho. Professor Hélder, obrigado por todas conversas e mensagens de incentivo, fundamentais nos momentos de indecisão que se apresentam em um doutorado.

Ao amigo Samir, por todas conversas e contribuições.

Aos amigos que sempre se mostram presentes: Adriano, Eduardo (Capivara), Rodrigo (Diguinho), Lucas, Daniel (Champs) e Carlos Augusto (Robertinho).

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Epígrafe

*“Forget your lust for the rich man’s gold
All that you need is in your soul
And you can do this, oh baby, if you try
All that I want for you, my son, is to be satisfied.”*

Lynyrd Skynyrd, 1973.

*“Ainda que eu tivesse o dom da profecia,
o conhecimento de todos os mistérios e de toda a ciência;
ainda que eu tivesse toda a fé, a ponto de transportar montanhas,
se não tivesse o amor, eu não seria nada.”*

1 Coríntios 13, 2.

Resumo

A identificação antecipada e a localização de pulsos de alta frequência relacionados às Descargas Parciais (*PDs*) no isolamento sólido de Transformadores de Potência possibilita a otimização e o planejamento das atividades de manutenção do equipamento, prevenindo paradas inesperadas e reduzindo o tempo de reparo. Embora diversas técnicas para a geração experimental e localização de sinais das *PDs* têm sido propostas na literatura, limitações podem ainda ser notadas, como dificuldades na geração de sinais de correntes similares às *PDs* em condições ainda iniciais da falha e a localização precisa destas descargas ao longo dos enrolamentos dos transformadores. Em vista disso, neste trabalho, novos métodos para a geração experimental de pulsos de alta frequência das *PDs* e localização destes sinais são propostos, baseados, respectivamente, na realização de distúrbios capacitivos ao longo de derivações extraídas em um enrolamento e na aplicação de modelos de Regressão Linear Múltipla (*MLR*). Os resultados mostram que as estratégias empregadas possibilitam a geração de pulsos de corrente similares às *PDs* resultantes da degradação incipiente do isolamento sólido dos transformadores e a localização efetiva destes pulsos ao longo do enrolamento, ainda que utilizando apenas sinais advindos de simulações computacionais no ajuste dos modelos de regressão. Outrossim, estudos de casos indicam que a estratégia de localização *MLR* pode ser aplicada na localização das *PDs* tanto nas configurações de enrolamentos *layer-type* quanto *disk-type*.

Palavras-chave: Degradação do isolamento sólido, descargas parciais, distúrbios capacitivos, localização de *PDs*, regressão linear múltipla.

Abstract

The early identification and location of high-frequency current pulses related to Partial Discharges (*PDs*) in the solid insulation system of Power Transformers enables the optimization and planning of maintenance interventions, preventing unexpected power interruptions and reducing downtime. Even though several techniques for *PD* signal experimental generation and location have been proposed in the literature, limitations can still be noted, such as the difficulties in generating current signals similar to the *PDs* in incipient conditions of the insulation degradation and in the appropriate location of these discharges. In view of these, in this work, new methods of experimental *PD* high-frequency current pulses generation and location are proposed, based on, respectively, the realization of small capacitive disturbances along taps of the transformer windings and in the use of Multiple Linear Regression models (*MLR*). The proposed strategies allow the generation of current pulses similar to the *PDs* resulting from the initial degradation of the transformers solid insulation and their effective location along the windings, even if only computational simulated data are employed in the adjustment of the locator linear regression models. In addition, case studies indicate that the *MLR* localization strategy can be applied to the location of *PDs* for both layer-type and disk-type winding configurations.

Keywords: Solid insulation degradation, partial discharges, capacitive disturbances, *PD* location, multiple linear regression.

ÍNDICE

Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Símbolos	xvi
Lista de Abreviações	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	5
1.2 Justificativas	5
1.3 Organização do Texto	6
2 Estado da Arte	8
2.1 Introdução	8
2.2 Mecanismo de evolução da falha	8
2.2.1 Descargas Parciais nos enrolamentos de transformadores	13
2.3 Métodos para detecção das <i>PDs</i>	15
2.3.1 Método elétrico convencional	16
2.3.2 Método químico - <i>DGA</i>	17

2.3.3	Método eletromagnético - <i>UHF</i>	17
2.3.4	Método acústico	18
2.3.5	Método óptico	19
2.3.6	Método elétrico não-convencional	20
2.4	Técnicas para localização das <i>PDs</i>	21
2.4.1	Curvas de interpolação	22
2.4.2	Variação dos zeros da resposta em frequência	23
2.4.3	Cálculo e comparação dos pulsos <i>PD</i> de entrada	25
2.4.4	Comparação entre formas de onda	25
2.4.5	Considerações sobre as técnicas de localização das <i>PDs</i>	27
2.5	Geração experimental de pulsos das <i>PDs</i>	28
2.6	Considerações do Capítulo	29
3	Aspectos Teóricos	31
3.1	Introdução	31
3.2	A modelagem <i>MTL</i> de enrolamentos	31
3.2.1	Inserção das <i>PDs</i> na <i>MTL</i>	33
3.2.2	Parâmetros para a modelagem <i>MTL</i>	35
3.3	Extração de características de sinais	38
3.4	Regressão Linear Múltipla	40
3.4.1	Método dos mínimos quadrados	42
3.4.2	Análise de Variância	45
3.4.2.1	Teste para a significância da regressão	46
3.4.2.2	Teste para a significância de regressores individuais	47
3.4.2.3	O <i>p</i> -valor	48
3.4.2.4	Coeficientes de determinação múltipla	49
3.4.2.5	Erro médio quadrático	50
3.4.3	Análise Residual	51

3.4.4	O método de ajuste <i>Stepwise</i>	52
3.5	Considerações do Capítulo	55
4	Aspectos Experimentais	56
4.1	Introdução	56
4.2	A bancada experimental	56
4.2.1	Projeto do enrolamento	56
4.2.2	Memorial de cálculo	59
4.2.3	Construção do protótipo	61
4.2.4	Equipamentos constituintes	62
4.3	Capacitores para os testes experimentais	64
4.3.1	Projeto dos capacitores	65
4.3.2	Construção dos capacitores	66
4.4	Considerações do Capítulo	67
5	Geração e Localização das PDs	69
5.1	Introdução	69
5.2	Testes experimentais	70
5.3	Pré-processamento dos sinais medidos	73
5.4	Modelagem <i>MTL</i>	76
5.4.1	Obtenção dos parâmetros do protótipo	77
5.4.2	Simulação computacional	79
5.5	Extração de características	80
5.6	Ajuste dos modelos <i>MLR</i>	83
5.7	Considerações do Capítulo	86
6	Resultados	87
6.1	Introdução	87
6.2	Localização das PDs no protótipo construído	88

6.2.1	Comparação entre sinais simulados e medidos	88
6.2.2	Desempenho para características estatísticas	91
6.2.3	Desempenho para características <i>PCA</i>	98
6.3	Estudos de casos	103
6.3.1	Desempenho para características estatísticas	108
6.3.2	Desempenho para características <i>PCA</i>	114
6.4	Considerações do Capítulo	116
7	Conclusões e Perspectivas Futuras	119
7.1	Introdução	119
7.2	Discussões	119
7.3	Propostas de continuidade	121
7.4	Publicações	122
	Referências Bibliográficas	123
A	Equipamentos da Bancada Experimental	139
B	Configurações de capacitores	141
C	Tabela da distribuição F para um nível de significância $\alpha = 0,05$	143
D	Tabela da distribuição t	145

LISTA DE TABELAS

2.1	Características dos principais métodos utilizados na investigação de PDs em transformadores de potência.	21
4.1	Capacitores de fibra de vidro para testes experimentais com descargas de até 5000 pC , sendo o protótipo alimentado por tensão senoidal de $3,15\text{ kV}$ de pico.	67
5.1	Variáveis características estatísticas extraídas dos sinais terminais.	81
5.2	Variáveis características PCA extraídas dos sinais terminais.	82
6.1	Análise de variância para o modelo da Equação (6.1).	93
6.2	Teste t -estatístico para o modelo da Equação (6.1).	93
6.3	Percentual de acertos do modelo MLR ajustado com características estatísticas na localização das PDs experimentais.	96
6.4	Percentual de acertos da ANN treinada com características estatísticas na localização das PDs experimentais.	98
6.5	Análise de variância para o modelo da Equação (6.2).	99
6.6	Teste t -estatístico para o modelo da Equação (6.2).	99
6.7	Percentual de acertos do modelo MLR ajustado com características PCA na localização das PDs experimentais.	101

6.8	Percentual de acertos da <i>ANN</i> treinada com características <i>PCA</i> na localização das <i>PDs</i> experimentais.	103
6.9	Valores estimados para as capacitâncias dos enrolamentos dos estudos de casos.	105
6.10	Análise de variância para o modelo da Equação (6.3).	110
6.11	Análise de variância para o modelo da Equação (6.4).	110
6.12	Percentual de acertos para características estatísticas nos estudos de casos. . .	113
6.13	Análise de variância para o modelo da Equação (6.5).	114
6.14	Análise de variância para o modelo da Equação (6.6).	114
6.15	Percentual de acertos para características <i>PCA</i> nos estudos de casos.	117
C.1	Tabela da distribuição <i>F</i> para um nível de significância $\alpha = 0,05$	144
D.1	Tabela da distribuição <i>t</i>	145

LISTA DE FIGURAS

1.1	Taxa de falhas do transformador em função do número de anos em serviço, de acordo com Metwally (2011)	2
1.2	Distribuição das falhas em transformadores de potência, segundo Marques et al. (2014)	4
1.3	Distribuição das falhas em transformadores de potência, segundo Murugan e Ramasamy (2015)	4
2.1	Vistas frontal e superior dos enrolamentos de um transformador de potência. Adaptada de Ang e Salam (2012)	9
2.2	Fórmula estrutural da celulose do isolamento sólido.	10
2.3	Variação das <i>PDs</i> com o tempo, segundo Niasar et al. (2015) (a) número de ocorrências; (b) intensidade das descargas.	14
3.1	Espiras do enrolamento como linhas de transmissão acopladas.	32
3.2	Principais acoplamentos capacitivos existentes nos enrolamentos <i>disk-type</i>	37
3.3	Principais acoplamentos capacitivos existentes nos enrolamentos <i>layer-type</i>	37
3.4	Efeito da extração de características pela <i>PCA</i>	41
3.5	Fluxograma do processo de ajuste de modelos <i>MLR</i> pelo método <i>Stepwise</i>	54

4.1	Dimensões do núcleo utilizado na construção do protótipo.	59
4.2	Representação do enrolamento de 4 camadas construído.	61
4.3	Protótipo de enrolamento de 4 camadas construído: (a) extração de uma derivação; (b) perspectiva.	62
4.4	Terminais das derivações do enrolamento construído.	63
4.5	Visão geral da bancada de testes.	64
4.6	Esquematico das conexões da bancada de testes.	64
4.7	Configuração de capacitor de placas paralelas.	65
4.8	(a) Menor e maior capacitores construídos; (b) comparação entre os valores de capacitância esperados e medidos.	68
5.1	Geração de pulso da PD pela descarga de um capacitor: (a) circuito simulado; (b) forma de onda obtida.	71
5.2	Sinais terminais no osciloscópio para distúrbio capacitivos em: (a) 88%; (b) 45%; e (c) 12% do enrolamento.	73
5.3	Sinais terminais medidos para distúrbio capacitivo em 12% do enrolamento.	74
5.4	Espectro de frequências do sinal captado no terminal de alimentação para distúrbio em 12% do enrolamento.	75
5.5	Pré-processamento dos sinais medidos para distúrbio capacitivo em 12% do enrolamento: (a) terminal aterrado; (b) terminal de alimentação.	77
5.6	Estrutura do enrolamento do protótipo e principais acoplamentos capacitivos.	78
6.1	Comparação entre os sinais terminais simulados e medidos no protótipo.	89
6.2	Características estatísticas extraídas dos sinais terminais simulados e medidos no protótipo: (a) σ_{it} ; (b) sk_{if} ; (c) E_{if} ; e (d) E_{it}	91
6.3	Características PCA extraídas dos sinais terminais simulados e medidos no protótipo: (a) PC_{11} ; (b) PC_{12} ; (c) PC_{21} ; e (d) PC_{22}	92

6.4	Gráficos para análise residual do modelo <i>MLR</i> de características estatísticas para o protótipo: (a) probabilidade normal dos resíduos; (b) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.	95
6.5	Desempenho do modelo <i>MLR</i> ajustado para características estatísticas na localização das <i>PDs</i> experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12,5\%$	96
6.6	Distribuição espacial de pontos característicos estatísticos extraídos dos sinais terminais medidos.	97
6.7	Desempenho da <i>ANN</i> treinada para características estatísticas na localização das <i>PDs</i> experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12,5\%$	98
6.8	Gráficos para análise residual do modelo <i>MLR</i> de características <i>PCA</i> para o protótipo: (a) probabilidade normal dos resíduos; (b) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.	100
6.9	Desempenho do modelo <i>MLR</i> ajustado para características <i>PCA</i> na localização das <i>PDs</i> experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12\%$	101
6.10	Distribuição espacial de pontos característicos <i>PCA</i> extraídos dos sinais terminais medidos.	102
6.11	Desempenho da <i>ANN</i> treinada para características <i>PCA</i> na localização das <i>PDs</i> experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12\%$	103
6.12	Sinais terminais simulados para <i>PD</i> em 55% do enrolamento: (a) Caso <i>i</i> ; (b) Caso <i>ii</i>	106
6.13	Características estatísticas extraídas dos sinais terminais simulados e medidos: (a) σ_{it} ; (b) sk_{if} ; (c) E_{if} ; e (d) E_{it}	107
6.14	Características <i>PCA</i> extraídas dos sinais terminais simulados e medidos: (a) PC_{11} ; (b) PC_{12} ; (c) PC_{21} ; e (d) PC_{22}	108
6.15	Gráficos para análise residual do modelo <i>MLR</i> de características estatísticas do estudo de caso <i>i</i> : (a) probabilidade normal dos resíduos; (a) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.	111

6.16	Gráficos para análise residual do modelo <i>MLR</i> de características estatísticas do estudo de caso <i>ii</i> : (a) probabilidade normal dos resíduos; (a) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.	112
6.17	Desempenho dos modelos <i>MLR</i> de características estatísticas na validação dos estudos de casos: (a) caso <i>i</i> ; (b) caso <i>ii</i>	113
6.18	Gráficos para análise residual do modelo <i>MLR</i> de características <i>PCA</i> do estudo de caso <i>i</i> : (a) probabilidade normal dos resíduos; (a) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.	115
6.19	Gráficos para análise residual do modelo <i>MLR</i> de características <i>PCA</i> do estudo de caso <i>ii</i> : (a) probabilidade normal dos resíduos; (b) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.	116
6.20	Desempenho dos modelos <i>MLR</i> de características <i>PCA</i> na validação dos estudos de casos: (a) caso <i>i</i> ; (b) caso <i>ii</i>	117
B.1	Configuração de capacitor de condutores circulares paralelos.	141
B.2	Configuração de capacitor cilíndrico.	142

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Nível de significância;
β	Coeficientes dos modelos <i>MLR</i> ;
β	Matriz de coeficientes da <i>MLR</i> ;
γ	Matriz dos autovalores de $\sqrt{\mathbf{ZY}}$;
δ	Patamar de erro para avaliação dos modelos <i>MLR</i> ;
ϵ	Patamar de erro da modelagem <i>MLR</i> ;
ε	Permissividade elétrica relativa;
μ	Média estatística;
σ	Desvio padrão;
$\mathbf{C}$	Matriz de capacitâncias;
C_c	Capacitância entre espiras de camadas adjacentes;
C_d	Capacitância entre espiras de discos adjacentes;
C_e	Capacitância entre espiras adjacentes de uma mesma camada/disco;
C_E	Capacitância entre espiras de enrolamentos adjacentes;
C_t	Capacitância entre espiras da camada mais interna e o núcleo;
C_T	Capacitância entre espiras da camada mais externa e o tanque;
f	Frequência;
$\mathbf{G}$	Matriz de condutâncias;

I_{PD}	Sinal de corrente da PD no ponto de injeção;
$I_R(m)$	Sinal de corrente da PD na extremidade de aterramento do enrolamento;
$I_S(1)$	Sinal de corrente da PD na extremidade de alimentação do enrolamento;
k	Número de variáveis de entrada para a modelagem MLR ;
ku	<i>Kurtosis</i> ;
L	Matriz de indutâncias;
m	Número de espiras/linhas para a MTL ;
n	Número de observações para o método dos mínimos quadrados;
n_t	Número de testes experimentais ou simulados;
N	Número de amostras de um dado sinal;
PC	Características de componentes principais;
p	Ponto de ocorrência da PD ;
$p_{entrada}$	Limiar máximo para o <i>Stepwise</i> ;
p_{saida}	Limiar mínimo para o <i>Stepwise</i> ;
p_{valor}	Probabilidade associada aos testes estatísticos;
Q	Quantidade de carga/descarga;
Q_{ap}	Carga aparente de um sinal de corrente;
R	Matriz de resistências;
R^2	Coeficiente de determinação múltipla;
R^2_{adj}	Coeficiente de determinação múltipla ajustado estatisticamente;
$RMSE$	Erro médio quadrático;
sk	<i>Skewness</i> ;
SQ_e	Soma dos quadrados devido ao erro;
SQ_r	Soma dos quadrados devido a regressão;
SQ_t	Soma dos quadrados total;
T	Matriz da MTL com as condições de fronteira e simplificações incorporadas;
Tv	Matriz dos autovetores de $\sqrt{ZY}$;

w	Frequência angular;
x	Variável de entrada para a MLR ;
$\mathbf{X}$	Matriz de variáveis de entrada da MLR ;
y	Variável de saída para a MLR ;
$\mathbf{y}$	Matriz de saída da MLR ;
$\mathbf{Y}$	Matriz de admitâncias da MTL ;
$\mathbf{Z}$	Matriz de impedâncias da MTL ;
Z_f	Impedância terminal na extremidade de alimentação do enrolamento;
Z_t	Impedância terminal na extremidade de aterramento do enrolamento.

LISTA DE ABREVIACÕES

<i>ANN</i>	Redes Neurais Artificiais;
<i>ANOVA</i>	Análise de Variâncias;
<i>MLR</i>	Regressão Linear Múltipla;
<i>MTL</i>	Múltiplas Linhas de Transmissão;
<i>PCA</i>	Análise de Componentes Principais;
<i>PD</i>	Descarga Parcial.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são um dos equipamentos mais caros e estrategicamente importantes dos sistemas elétricos, sendo empregados, principalmente: i) na elevação da tensão gerada nas usinas hidrelétricas, termoeletricas, nucleares, dentre outras, das poucas dezenas de *kilovolts*, disponíveis nas saídas das máquinas geradoras, para níveis de centenas de *kilovolts*, adequados para uma transmissão econômica de energia a grandes distâncias; ii) na interconexão de sistemas de transmissão com diferentes níveis de tensão, de modo que as potências ativa e reativa possam ser intercambiadas; e iii) na reversão da tensão do nível de transmissão para um nível apropriado para a distribuição, em subestações abaixadoras.

De modo geral, os transformadores de potência são equipamentos bem construídos e robustos. Nas etapas de projeto e manufatura, o campo elétrico e magnético aos quais o equipamento estará submetido, juntamente com as propriedades térmicas e elétricas do mesmo, são cuidadosamente considerados. Neste sentido, um elevado fator de segurança é empregado na avaliação do sistema isolante, normalmente composto por papel impregnado com óleo nos transformadores de maior potência, de modo a garantir que estes sejam capazes de suportar possíveis surtos de tensão decorrentes de descargas atmosféricas, manobras de chaveamento e curto-circuitos externos, e que sua deterioração natural ocorra de forma lenta. Por conseguinte, os transformadores de potência têm uma vida útil relativamente longa, em torno de 35

anos quando submetidos a condições normais de operação, período em que apresentam uma taxa de falhas inferior a 5%, conforme discutido em [Metwally \(2011\)](#) e ilustrado na Figura 1.1. Acima de 35 anos em serviço, a taxa de falhas apresenta um crescimento aproximadamente exponencial.

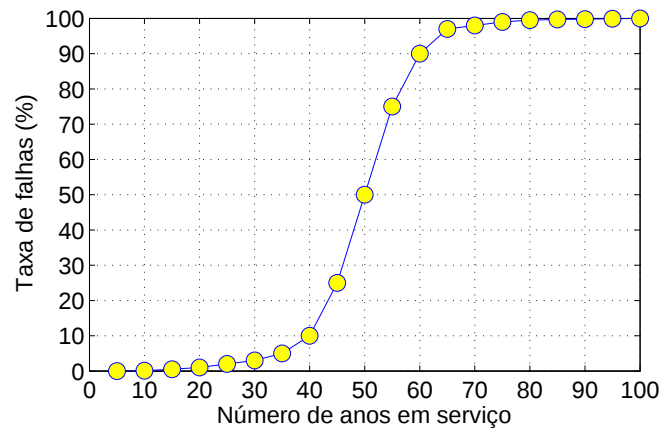


Figura 1.1: Taxa de falhas do transformador em função do número de anos em serviço, de acordo com [Metwally \(2011\)](#).

Todavia, devido ao constante crescimento, em nível mundial, da demanda de energia elétrica e dos volumes de energia transferidos, os transformadores de potência vêm sendo submetidos a diversos esforços operacionais, tais como sobrecargas, que aceleram consideravelmente seu processo de envelhecimento e, como resultado direto, aumentam a incidência de falhas ([Metwally, 2011](#)). Além disso, uma vez que a maioria desses transformadores foram instalados no período de expansão dos sistemas elétricos, entre as décadas de 70 e 80, nos dias de hoje, muitos destes equipamentos se encontram no final de sua vida útil, em que uma maior ocorrência de falhas é esperada.

No contexto de um sistema elétrico, a ocorrência inesperada de uma falha pode ocasionar diversos transtornos, como: interrupção do fornecimento de energia para uma larga quantidade de consumidores, incluindo grandes cidades e plantas industriais; perdas financeiras, seja pela aplicação de multas às concessionárias de energia, responsáveis pela operação contínua dos sistemas elétricos, paradas da produção industrial ou custos com o reparo, transporte ou compra de um novo equipamento; e, em caso de explosão do transformador, cujo óleo

isolante é facilmente inflamável, possibilidade de danos aos equipamentos adjacentes da subestação e risco a seres humanos. Por tais fatores, uma identificação antecipada de falhas nos transformadores de potência é crucial, visto que, além de evitar todos os problemas decorrentes de uma parada inesperada, como consequência da atuação dos dispositivos de proteção, principalmente, pode prevenir a evolução de falhas, ainda em estágios incipientes, para condições mais severas, que podem causar danos irreversíveis no equipamento.

Dos tipos de falhas que acometem os transformadores de potência, um estudo realizado pelo [CIGRE \(1983\)](#) (Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos - do Francês, *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*), em um período de 10 anos, entre 1968 e 1978, mostra que as falhas nos comutadores, enrolamentos e buchas apresentam um maior percentual de ocorrência, sendo responsáveis por aproximadamente 40%, 30% e 14% do total de falhas registradas, respectivamente.

Em [Minhas et al. \(1999\)](#), dados de falhas ocorridas em 188 transformadores de potência na África do Sul, em um período de aproximadamente 5 anos, entre 1994 e 1999, também mostram que cerca de 30% das falhas estão diretamente relacionadas aos enrolamentos dos transformadores.

Em trabalho mais recente, [Marques et al. \(2014\)](#) realizaram um estudo das principais falhas ocorridas em um período de 33 anos, entre 1979 e 2012, nos transformadores de potência da *CELG*, uma concessionária de energia elétrica do estado de Goiás, Brasil, mostrando que do total de 411 falhas registradas em 300 transformadores, aproximadamente 144 (35%) ocorreram nos enrolamentos, 86 (21%) nos comutadores e 49 (13%) nas buchas, conforme ilustrado na Figura 1.2. Segundo os autores, a degradação do sistema sólido isolante (papel) é o principal causador das falhas verificadas nos enrolamentos dos transformadores.

No trabalho de [Murugan e Ramasamy \(2015\)](#), 196 falhas ocorridas em transformadores de potência de concessionárias do estado de Tamil Nadu, na Índia, entre 2009 e 2013, foram analisadas. Pelos resultados apresentados, pode-se constatar que grande parte das falhas também ocorreram diretamente nos enrolamentos (14%), como mostrado na Figura 1.3, sendo que di-

agramas de causa e efeito indicaram que a falha de maior ocorrência (41%) está diretamente relacionada ao sistema isolante presente nos mesmos.

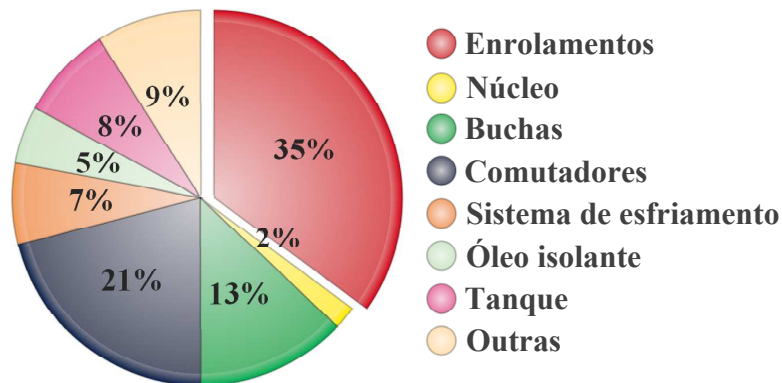


Figura 1.2: Distribuição das falhas em transformadores de potência, segundo [Marques et al. \(2014\)](#).

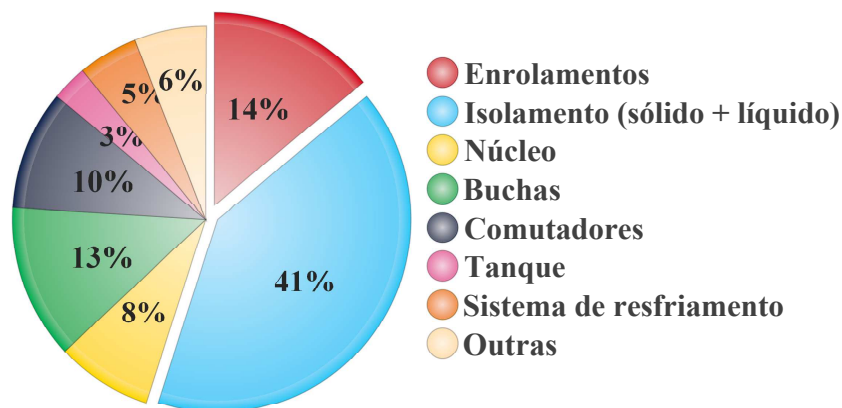


Figura 1.3: Distribuição das falhas em transformadores de potência, segundo [Murugan e Ramasamy \(2015\)](#).

Uma vez que as falhas nos enrolamentos dos transformadores apresentam grande percentual de ocorrência e que, diferentemente das falhas nas buchas e nos comutadores, estão diretamente relacionadas com o final da vida útil do equipamento, como discutido em [Wang et al. \(2002\)](#), [Hohlein e kachler \(2005\)](#), [Metwally \(2011\)](#), [Marques et al. \(2014\)](#), dentre vários outros trabalhos da literatura, neste trabalho é apresentada uma técnica para identificação e localização antecipada deste tipo de falha visando, respectivamente, evitar a parada inesperada do equipamento, e todos os transtornos consequentes, e reduzir o tempo necessário para a realização das atividades de reparo. O acontecimento de falhas nos enrolamentos dos

transformadores está intimamente ligado com a condição do sistema sólido isolante presente nos mesmos, de modo que estas falhas podem ser avaliadas pela manifestação de descargas parciais, fenômeno precursor e advindo do envelhecimento/deterioração do isolamento.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta tese é apresentar uma metodologia para a identificação e localização de falhas incipientes nos enrolamentos de transformadores de potência, por meio de pulsos de corrente de descargas parciais captados nas extremidades acessíveis destes enrolamentos.

Os seguintes objetivos específicos podem ser destacados, os quais sustentam as contribuições científicas deste trabalho de doutorado:

1. Proposição de uma nova forma de geração/injeção experimental de pulsos de corrente característicos das descargas parciais incipientes;
2. Aplicação da Regressão Linear Múltipla na estimação do local de ocorrência das descargas parciais ao longo dos enrolamentos, técnica ainda não testada neste tipo de problema e que constitui um método mais elementar para a classificação de sinais;
3. Avaliação da técnica de localização para as duas diferentes configurações de enrolamentos comumente empregadas nos transformadores de potência.

1.2 Justificativas

Este trabalho de doutorado se justifica pela aplicação de um método inédito para a geração experimental de pulsos de corrente de alta frequência em enrolamentos de transformadores, por meio de descargas de energia resultantes de distúrbios capacitivos, e pela investigação de modelos de Regressão Linear Múltipla para a determinação dos locais de ocorrência destas descargas ao longo dos enrolamentos. As estratégias abordadas possibilitam uma geração controlada de pulsos de corrente similares às descargas parciais, com tempo de subida e

quantidade de carga equivalentes às descargas resultantes da degradação inicial do isolamento sólido dos transformadores, e uma localização adequada das mesmas, contornando algumas dificuldades encontradas em métodos utilizados na literatura.

1.3 Organização do Texto

Este documento está estruturado em 7 Capítulos, contando com este Capítulo introdutório.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica do tema estudado, abordando o mecanismo de evolução das falhas no isolamento sólido dos enrolamentos de transformadores e a manifestação das descargas parciais neste processo, os principais meios de identificação e medição destas descargas, os métodos utilizados na literatura para a geração experimental dos pulsos de corrente deste fenômeno e as principais técnicas empregadas na localização das regiões deterioradas do enrolamento, por meio dos pulsos de corrente de alta frequência das descargas.

Os Capítulos 3 e 4 retratam os principais aspectos teóricos e experimentais envolvidos neste trabalho, respectivamente. Conceitos acerca da modelagem de enrolamentos de transformadores como linhas de transmissão acopladas, extração de características de sinais e regressão linear múltipla são discutidos no Capítulo 3. O Capítulo 4 expõe a bancada de testes projetada, construída e utilizada, bem como os capacitores preparados para o método experimental proposto para a geração das descargas parciais.

No Capítulo 5, os procedimentos empregados neste trabalho para a geração, identificação e localização das descargas parciais são discutidos. Tal metodologia se baseia na inserção de distúrbios capacitivos em derivações ao longo de enrolamentos de transformadores, para a geração experimental de pulsos de corrente de alta frequência similares àqueles das descargas parciais, captação destes pulsos nas extremidades acessíveis dos enrolamentos, extração de características estatísticas e de componentes principais dos mesmos, e na utilização de modelos de regressão linear, ajustados iterativamente pelo método *Stepwise*, na determinação dos locais de ocorrência das descargas. Tópicos relacionados à modelagem computacional do

protótipo de enrolamento desenvolvido neste trabalho, por meio da abordagem por linhas de transmissão acopladas, são também tratados neste Capítulo.

Os principais resultados obtidos são apresentados no Capítulo 6. Neste sentido, é realizada a localização dos pulsos de corrente experimentalmente gerados por meio de modelos de regressão linear, ajustados com dados de simulação computacional do protótipo, tanto para características estatísticas quanto de componentes principais dos sinais de corrente das descargas, e uma comparação de desempenho com Redes Neurais Artificiais. Ainda, é avaliada a aplicação dos modelos de regressão para localização de descargas parciais nas duas principais configurações de enrolamentos normalmente encontradas nos transformadores de potência.

Por fim, o Capítulo 7 ressalta as principais conclusões desta tese de doutorado e algumas perspectivas de continuidade.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

Neste Capítulo é realizada uma revisão da bibliografia relacionada ao tema deste trabalho. Deste modo, são discutidos os trabalhos mais relevantes encontrados na literatura, referentes aos mecanismos envolvidos na evolução da falha do isolamento sólido presente nos enrolamentos dos transformadores, desde sua origem até o seu colapso, às formas de identificação e medição de descargas parciais, fenômeno decorrente da degradação do isolamento, e aos principais métodos utilizados na geração experimental e na determinação do local de ocorrência dos pulsos de corrente das descargas.

2.2 Mecanismo de evolução da falha

A maioria dos transformadores de potência utiliza dois tipos de isolamento nos enrolamentos: sólido, nas formas de derivados da celulose como papel, papel prensado e madeira; e líquido, normalmente composto por óleo mineral ou vegetal. Desta forma, hastes e blocos de madeira ou papel prensado são empregados no aperto, sustentação, espaçamento e formação dos dutos de circulação de óleo que, além de contribuir no isolamento, exerce também a função de resfriamento dos enrolamentos. O papel, impregnado com óleo, é utilizado no

isolamento entre as espiras e demais materiais condutores do enrolamento. Ainda, barreiras de papel prensado, também em conjunto com o óleo isolante, realizam o isolamento entre os enrolamentos de alta tensão (*AT*) e de baixa tensão (*BT*), e isolamento entre o enrolamento *BT* e o núcleo.

A Figura 2.1 ilustra a estrutura geral dos enrolamentos de um transformador de potência composto por vários discos empilhados (*disk-type*), onde as principais partes constituintes podem ser indentificadas. Neste tipo de configuração, as espiras de cada disco são disponibilizadas na horizontal, contínua e concentricamente. Contudo, segundo [Del Vecchio et al. \(2010\)](#), enrolamentos constituídos por camadas verticais contínuas de condutores (*layer-type*) são também empregados, apresentando basicamente os mesmos componentes.

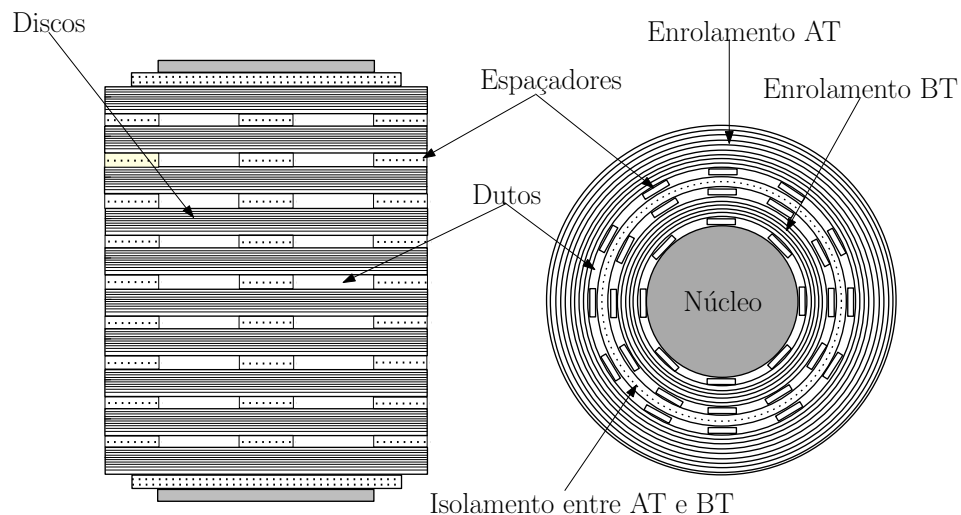


Figura 2.1: Vistas frontal e superior dos enrolamentos de um transformador de potência. Adaptada de [Ang e Salam \(2012\)](#).

Tanto o óleo isolante quanto o isolamento sólido degradam/envelhecem naturalmente com o tempo de operação. No entanto, uma vez que os transformadores normalmente possuem válvulas de acesso ao interior do tanque, o óleo isolante deteriorado pode ser trocado em paradas programadas do equipamento. Por outro lado, o isolamento sólido deteriorado, o qual se encontra no cerne dos enrolamentos, é de difícil acesso, sendo necessário uma completa abertura do transformador nos casos de reparo. Além disso, devido à complexidade estrutural dos enrolamentos, a inspeção visual em busca das regiões degradadas do isolamento sólido é uma

tarefa árdua e demorada. Por tais motivos, o final da vida útil dos transformadores de potência está diretamente relacionada com o estado de seu sistema sólido isolante, principalmente no que concerne as propriedades mecânicas e elétricas do papel isolante.

A celulose do isolamento sólido é uma cadeia polimérica linear e cíclica de anéis de glicose, conforme ilustrado na Figura 2.2. Segundo Lundgaard *et al.* (2004), CIGRE (2007) e Homagk *et al.* (2008), a degradação da celulose ocorre essencialmente pelo processo de despolimerização¹, que consiste na ruptura e encurtamento das longas cadeias de glicose em cadeias menores, provocado por reações químicas de hidrólise, pirólise e oxidação.

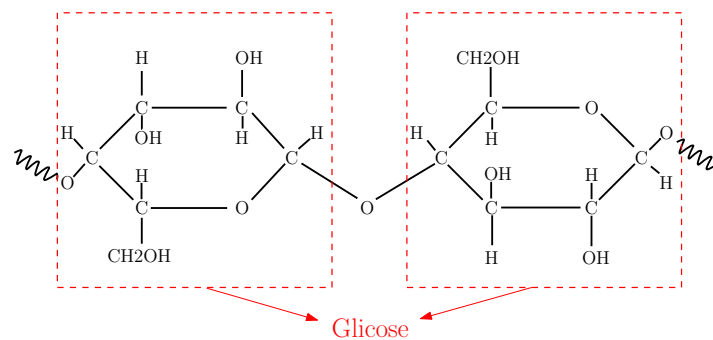


Figura 2.2: Fórmula estrutural da celulose do isolamento sólido.

Caso o transformador opere em condições nominais, o envelhecimento da celulose do isolamento sólido pode levar diversas décadas. Contudo, se o transformador estiver submetido a constantes esforços elétricos e de temperatura, aliados à presença de umidade, oxigênio e produtos ácidos em seu interior, o processo de degradação da celulose pode ser largamente acelerado. Tal fato é notório na literatura e experimentalmente verificado em diversos trabalhos, como em Montsinger (1930), Fabre e Pichon (1960), Shroff e Stannett (1985), Yoshida *et al.* (1987), Ali *et al.* (1996), Lundgaard *et al.* (2004) e Shuai *et al.* (2014).

Os esforços elétricos degradadores do isolamento sólido associam-se aos elevados gradientes de tensão entre partes do enrolamento, como resultado de descargas atmosféricas, manobras de chaveamento, curto-circuitos externos, dentre outros. Devido a tais esforços, a rigidez dielétrica do isolamento sólido pode ser momentaneamente rompida, ocasionando uma descarga elétrica e uma consequente avaria no material isolante. Segundo Van Bolhuis

¹Reversão de um polímero (macromolécula) em moléculas menores de mesma composição (monômeros).

et al. (2002) e Fuhr (2012), os esforços elétricos também estão relacionados com a atividade de pequenas descargas elétricas em defeitos no interior do isolamento sólido, como em cavidades, bolhas de ar ou partículas metálicas contaminantes, resultantes de um processo de fabricação inadequado do próprio isolamento ou da montagem do transformador. Com a intermitente ocorrência destas pequenas descargas, determinadas trilhas, conhecidas como arborescências (*electrical treeing*), se formam na região defeituosa do dielétrico, as quais tendem a crescer até o colapso elétrico do mesmo.

Os esforços térmicos se relacionam com o aumento da temperatura no interior do transformador, como consequência, principalmente, da circulação de sobrecorrentes nos enrolamentos, devido a sobrecargas, ou falhas no sistema de resfriamento. De acordo com Arshad e Islam (2011) e Lelekakis *et al.* (2012), a degradação da celulose aumenta significativamente para temperaturas superiores a 140 °C. Nestas elevadas temperaturas ocorrem as reações químicas de pirólise, que causam a ruptura dos anéis de glicose da celulose em monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e hidrogênio (H₂) (McNutt, 92).

A presença de umidade no interior do tanque do transformador também exerce grande influência na degradação do isolamento sólido. Conforme discutido em Lundgaard *et al.* (2004) e Lelekakis *et al.* (2014), a água atua de forma a dissociar íons de ácidos carboxílicos, dissolvidos no óleo do transformador como consequência de sua própria degradação, que são catalisadores de reações de hidrólise na celulose, causando o rompimento das pontes de oxigênio existentes entre os anéis de glicose. Em condições normais, o papel isolante possui um teor de umidade em torno de 0,5%. Contudo, este conteúdo pode ser acrescido de diversas maneiras, seja pela entrada da umidade externa através de furos ou brechas no tanque, ou até mesmo como resultado das reações de decomposição térmica do papel isolante, que têm moléculas de água como subproduto. De acordo com Arshad e Islam (2011), a taxa de degradação da celulose é proporcional à quantidade de umidade presente no interior do transformador, sendo que um conteúdo superior a 4% é classificado como situação de falha iminente. Em Van Bolhuis *et al.* (2002) e Lelekakis *et al.* (2012) é afirmado que um teor de

umidade desta proporção aumenta a taxa de degradação da celulose do isolamento sólido em até 20 vezes.

Além da hidrólise, a presença de umidade no interior do transformador pode causar outros problemas. Conforme exposto em [Arshad e Islam \(2011\)](#), devido à sua natureza higroscópica, o papel isolante pode absorver a água e formar bolhas em sua extensão, no interior das quais podem ocorrer descargas elétricas que também causam sua degradação. Ademais, a presença de umidade no papel impregnado com óleo pode causar uma redução em sua rigidez dielétrica.

Outro fator degradador do isolamento sólido está relacionado à presença de oxigênio no interior dos transformadores. O oxigênio, livre na atmosfera, pode adentrar no tanque pelos mesmos caminhos encontrados pela umidade externa, ou seja, através de furos ou por imperfeições na sua vedação. Segundo [McNutt \(92\)](#) e [Lelekakis *et al.* \(2012\)](#), as moléculas de oxigênio promovem reações de oxidação nos grupos etílicos da celulose ($-OH$), abrindo os anéis de glicose e causando o rompimento da cadeia. Os seguintes produtos são gerados por estas reações de oxidação: aldeídos, ácidos, CO , CO_2 e H_2O , sendo que este último contribui ainda em reações secundárias de hidrólise. De acordo com [Fabre e Pichon \(1960\)](#), na presença de oxigênio, a taxa de envelhecimento da celulose é aumentada por um fator de 2,5. Ainda, segundo [Arshad e Islam \(2011\)](#), o efeito da umidade é mais crítico na presença de oxigênio.

Em situações reais, conforme discutido em [Sokolov *et al.* \(1999\)](#) e [Van Bolhuis *et al.* \(2002\)](#), o mecanismo de degradação da celulose do isolamento sólido ocorre por uma composição de esforços, sendo um destes dominante. A princípio, tal fato pode ser notado pela ocorrência de reações secundárias de hidrólise como consequência da água gerada nas reações de decomposição térmica e oxidação. Além disso, a água produzida nestas reações, ou mesmo proveniente do meio externo, pode ser absorvida pelo papel isolante, formando bolhas em sua extensão e propiciando o surgimento de esforços elétricos, na forma de pequenas descargas elétricas. Ainda, uma vez que o oxigênio e a umidade externa possuem um mesmo caminho

de penetração no tanque do transformador, as reações de hidrólise e oxidação, causadas por estes elementos, respectivamente, podem impactar a celulose de forma conjunta.

2.2.1 Descargas Parciais nos enrolamentos de transformadores

Independentemente dos tipos e do número de fatores envolvidos com a constante degradação da celulose, as propriedades mecânicas e elétricas do papel isolante dos transformadores são continuamente depreciadas. Segundo [Fuhr \(2009\)](#), a combinação de diferentes fatores degradantes gera regiões eletricamente fracas no sistema sólido isolante, nas quais, frente ao elevado campo elétrico existente no interior dos transformadores, se iniciam a atividade de pequenas descargas elétricas, denominadas Descargas Parciais (*PDs* - *Partial Discharges*), cuja natureza é semelhante àquela das descargas existentes nos pequenos defeitos do isolamento (bolhas de ar e partículas metálicas contaminantes).

Segundo [Giese \(1994\)](#), as regiões eletricamente fracas onde há o advento das *PDs* estão relacionadas a pequenas imperfeições na superfície do isolamento sólido, decorrentes do seu processo de deterioração. Tal fato é experimentalmente comprovado nos trabalhos de [Tang et al. \(2008\)](#), [Liao et al. \(2008\)](#) e [Shuai et al. \(2014\)](#), onde microscópios atômicos são empregados na análise superficial de amostras do papel impregnado com óleo, ao longo de processos de envelhecimento térmico acelerado realizados em laboratório. Nestes trabalhos é mostrado que as imperfeições superficiais se manifestam como fendas, originadas pela ruptura e encurtamento das fibras de celulose durante o processo de degradação. De acordo com [Shuai et al. \(2014\)](#), estes “buracos” microscópicos na superfície do papel isolante consistem, de fato, regiões eletricamente fracas, no interior das quais se iniciam a atividade das *PDs*.

Da literatura consultada, é possível perceber que a ocorrência de *PDs* sempre será uma etapa presente no mecanismo de degradação do isolamento sólido dos transformadores. A partir deste momento, o processo de deterioração do papel continua, agora composto pelo conjunto de esforços previamente envolvidos e pelos esforços elétricos causados pelas próprias descargas parciais. Neste sentido, conforme discutido e experimentalmente analisado

em [Okabe et al. \(2010\)](#), PDs de aproximadamente 10000 pC já são capazes de provocar pequenas erosões macroscópicas em estruturas de papel prensado, como consequência do choque de elétrons das descargas com as partes constituintes do material.

Em [Yang et al. \(2010\)](#), a atividade das PDs é analisada ao longo do completo processo de degradação elétrica de amostras do papel isolante, mostrando que o número de ocorrências e a intensidade das descargas aumentam ao longo do processo de deterioração, culminando no colapso elétrico das amostras. Tal fato é também notado no trabalho de [Wang et al. \(2010\)](#) onde, além de esforços elétricos, esforços térmicos são empregados no processo de degradação laboratorial de amostras de papel impregnado com óleo.

Segundo [Niasar et al. \(2015\)](#), com o avanço da degradação, o número de ocorrências e a intensidade das PDs tende a aumentar rapidamente e, então, reduzir para um valor intermediário, como ilustrado na Figura 2.3. Com a intermitente ocorrência destas descargas, certas trilhas tendem a se formar no interior do material isolante, até o estabelecimento de um canal fixo no mesmo, causando o seu colapso.

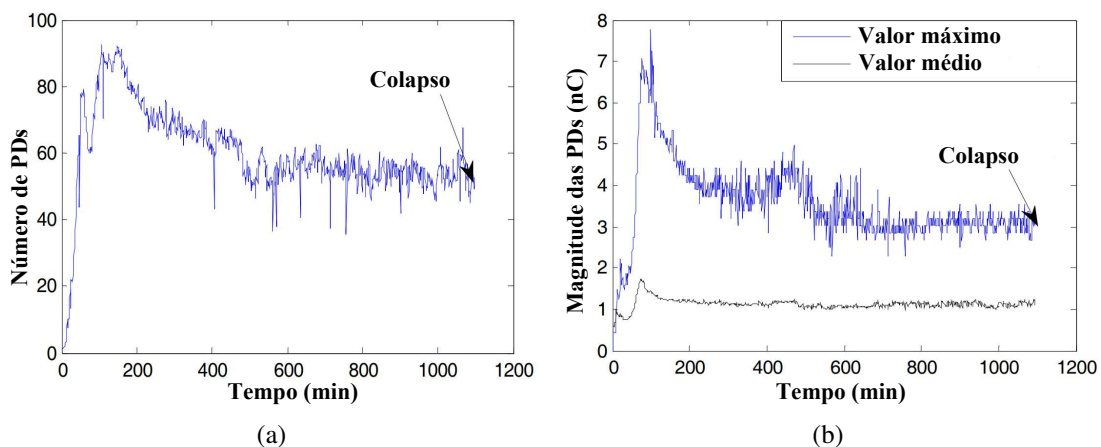


Figura 2.3: Variação das PDs com o tempo, segundo [Niasar et al. \(2015\)](#) (a) número de ocorrências; (b) intensidade das descargas.

Em [Zhong et al. \(2010\)](#), onde também é investigado o desenvolvimento das PDs ao longo de um completo processo de degradação de amostras do isolamento sólido, é evidenciado que estas descargas se manifestam de duas formas distintas. Inicialmente, as PDs ocorrem, principalmente, na superfície do papel deteriorado, degradando-o ainda mais. Em seguida,

estas descargas superficiais evoluem para *PDs* internas que progridem até a formação de um canal fixo entre as partes isoladas, ocasionando o colapso elétrico do isolamento e o estabelecimento de um curto-circuito entre condutores (espiras) do enrolamento.

Na situação de curto-circuito inicial, ainda envolvendo poucas espiras do enrolamento, os dispositivos existentes para a proteção do transformador não devem atuar de forma imediata. Nesta condição, uma elevada corrente fluirá na região das espiras curto-circuitadas; contudo, a manifestação na corrente de linha do transformador é insuficiente para disparar os relés de proteção diferencial por sobrecorrente (Bhide *et al.*, 2010; Behjat e Vahedi, 2011). Logo, o transformador será mantido em operação, com a circulação de uma elevada corrente na região das espiras em curto, cujo efeito deteriorará o isolamento sólido vicinal, aumentando o número de espiras atingidas e a proporção da falha. Então, o curto-circuito expandirá, até que o seu impacto seja suficiente para atuar os dispositivos de proteção e retirar o transformador de operação. Neste ponto, o enrolamento do equipamento já pode estar bastante comprometido, apresentando consideráveis deformações devido às forças envolvidas nas regiões em curto-circuito (Bagheri *et al.*, 2013).

Visto que as *PDs* sempre estarão presentes no processo de degradação do isolamento sólido dos transformadores e que, de certo modo, representam uma etapa inicial neste processo, a atividade destas descargas pode ser utilizada como “sintomas” precursores da falha de isolamento, de modo que sua identificação antecipada pode ser utilizada como alarme e prevenir a evolução de falhas, ainda em estágios incipientes, para condições de curto-circuito. Com isto, as atividades de manutenção do transformador podem ser adequadamente programadas e sua parada inesperada, com todos os consequentes transtornos, evitada.

2.3 Métodos para detecção das *PDs*

Conforme discutido em Stone (2005), quando uma descarga parcial ocorre, há um rápido fluxo de elétrons entre as partes degradadas do isolamento sólido. Tal fluxo tem duração aproximada de algumas dezenas de nanosegundos e, uma vez que os elétrons em movimento

possuem carga, em cada descarga, há a criação de um pulso de corrente², cujo espectro de frequências pode alcançar a faixa de centenas de *megahertz*. Em conjunto com a corrente elétrica, alguns fenômenos físicos secundários são também produzidos em cada descarga, tais como: onda eletromagnética irradiada, devido à aceleração de cargas elétricas; onda de pressão acústica, excitada mecanicamente pela pequena “explosão” da *PD*; e luminosidade, devido à liberação de energia dos elétrons excitados. Ademais, como consequência das reações químicas de degradação da celulose, alguns produtos gasosos são produzidos.

De modo geral, as técnicas utilizadas para a detecção das *PDs* em equipamentos de alta tensão, como os transformadores de potência, se baseiam na identificação dos fenômenos produzidos e provocados por estas descargas parciais. Deste modo, e como apontado nos trabalhos de Schwarz *et al.* (2008) e Hikita *et al.* (2008), os métodos para a localização das *PDs* se dividem em: elétrico convencional, químico (*DGA - Dissolved Gases Analysis*), eletromagnético (*UHF - Ultra High Frequency*), acústico, óptico e elétrico não-convencional. Cada método, no entanto pode ainda ser classificado de acordo com a sensibilidade de detecção, possibilidade de aplicação nos locais onde os transformadores estão instalados (*on-site*), como em subestações, possibilidade de aplicação em tempo real (*on-line*) e possibilidade de determinação do local de ocorrência das *PDs* no interior dos transformadores.

2.3.1 Método elétrico convencional

O método elétrico normatizado para detecção e medição das *PDs* é regido pelas normas IEC60270 (2000) e IEEEStdC57.12.90 (2006). Esta técnica se baseia na utilização de um capacitor de acoplamento como sensor, que atua como um caminho de menor impedância para os pulsos das *PDs*, de modo que, em cada descarga, o movimento de cargas elétricas é refletido no carregamento do sensor. De acordo com Hikita *et al.* (2008), a sensibilidade de detecção deste método é bem elevada, podendo captar *PDs* menores que 100 *pC*. Contudo, a alta susceptibilidade a ruídos e interferências externas, juntamente com os problemas de

² $i = dQ/dt$.

transporte e instalação do capacitor de acoplamento e da necessidade de uma fonte de alta tensão livre de *PDs*, impossibilitam a utilização do método elétrico convencional em aplicações *on-site/on-line*. Ademais, na literatura consultada, não foram encontradas aplicações deste método na localização das descargas parciais.

2.3.2 Método químico - *DGA*

O método *DGA* é baseado na análise dos gases dissolvidos no óleo do transformador, consequentes da deterioração do isolamento sólido, seja pela atividade das *PDs* ou por algum outro fator degradador. A partir de amostras do óleo, relações entre os níveis de acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), metano (CH_4), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2) são investigadas e podem indicar a ocorrência das descargas parciais no isolamento.

Da literatura consultada, o maior número de trabalhos relacionados à detecção de falhas em transformadores de potência remonta a utilização da *DGA*, como em [Lin et al. \(1993\)](#), [Wang et al. \(1998\)](#), [Duval \(2002\)](#), [Duval e Dukarm \(2005\)](#), [Gomez et al. \(2014\)](#), dentre vários outros. As principais razões para a sua grande aplicabilidade estão relacionadas à facilidade de obtenção das amostras de óleo do transformador, por meio das válvulas de acesso ao interior do tanque, e pela possibilidade de diagnóstico do tipo de agente degradador do isolamento, uma vez que existem guias para uma interpretação das relações entre os gases encontrados, como a norma [IEEEStdC57.104 \(2008\)](#). Contudo, a maioria das aplicações da *DGA* é realizada em situações *off-line*, principalmente como uma técnica de manutenção preventiva do transformador, onde as amostras de óleo são periodicamente coletadas e analisadas. Outra desvantagem deste método está relacionado à impossibilidade de localização da região deteriorada do isolamento.

2.3.3 Método eletromagnético - *UHF*

No método *UHF*, a onda eletromagnética irradiada pela *PD* é captada por meio de antenas, inseridas no interior do tanque do transformador através das válvulas de acesso.

Segundo [Aschenbrenner et al. \(2005\)](#) e [Hikita et al. \(2008\)](#), as principais vantagens deste método são: reduzida susceptibilidade a ruídos, uma vez que a faixa de frequência das medições, geralmente entre 500 *MHz* e 1500 *MHz*, é distinta da faixa de frequência dos ruídos, que se encontra abaixo de 1 *MHz*; reduzida susceptibilidade às interferências externas, como o corona de linhas de transmissão adjacentes, devido à blindagem promovida pelo próprio tanque do transformador; e possibilidade de determinação da região de ocorrências das *PDs*. Contudo, uma vez que a onda eletromagnética é largamente atenuada durante a sua propagação, desde o ponto de ocorrência da descarga até o sensor, como consequência, principalmente, da complexidade estrutural dos enrolamentos e da diversidade de materiais existentes no interior dos transformadores, o método *UHF* apresenta uma reduzida sensibilidade. Todavia, caso técnicas de amplificação sejam empregadas, a sensibilidade de medição pode alcançar níveis moderados.

Diversos trabalhos na literatura investigam a utilização da técnica *UHF* no monitoramento *on-site/on-line* e na localização de *PDs* em transformadores, como em [Pearson et al. \(1998\)](#), [Aschenbrenner et al. \(2005\)](#), [Judd et al. \(2005\)](#), [Tenbohlen et al. \(2008\)](#), [Coenen e Tenbohlen \(2012\)](#) e [Sinaga et al. \(2012\)](#). Via de regra, a diferença entre os tempos de chegada da onda eletromagnética em diversos sensores, em conjunto com técnicas de triangularização, são utilizadas na determinação do local de ocorrência das *PDs*. Neste ponto, quanto mais sensores estiverem instalados, maior a precisão do local estimado. Todavia, uma vez que os transformadores de potência raramente possuem mais de 3 válvulas de acesso ao interior do tanque, no máximo 3 antenas *UHF* podem ser instaladas, número insuficiente para uma estimativa precisa do local de ocorrência das *PDs* ([Coenen e Tenbohlen, 2012](#)).

2.3.4 Método acústico

Para uma correta determinação da localização das *PDs* no interior dos transformadores, amplamente, é empregado o método acústico. Diversas aplicações puderam ser encontradas na literatura, como em [Howells e Norton \(1978\)](#), [Howells e Norton \(1981\)](#), [Lundgaard \(1992\)](#),

Eleftherion (1995), Kweon *et al.* (2005), Bua-Nunez *et al.* (2014), dentre várias outras.

Neste método, sensores piezoelétricos são instalados no exterior do tanque dos transformadores de modo a detectarem as ondas sonoras emitidas pelas descargas parciais. Assim como o método *UHF*, este método pode ser aplicado *on-site/on-line* e diferenças entre os tempos de detecção de diversos sensores e técnicas de triangularização são empregadas na localização das *PDs*. No entanto, como não existem limitações para o número de sensores empregados, uma maior precisão pode ser obtida na determinação dos locais de ocorrência das *PDs*. Por outro lado, como a banda de medição está concentrada em torno de 40 *kHz* (ultrassom), e uma vez que não existe o efeito de blindagem promovido pelo tanque, o método acústico é susceptível a ruídos e interferências externas. Com isso, a baixa sensibilidade, ocasionada pela atenuação das ondas acústicas durante sua propagação em diferentes meios, não pode ser contornada com o auxílio de amplificadores.

De acordo com Fuhr (2005) e Rubio-Serrano *et al.* (2012), a baixa sensibilidade de medição do método acústico, afeta diretamente a capacidade de detecção e localização de *PDs* internas no isolamento sólido, como aquelas decorrentes da degradação deste isolamento.

2.3.5 Método óptico

Outra possibilidade de aplicação *on-site* para a análise de *PDs* em transformadores, imune a ruídos e interferências externas, consiste na utilização de fibras ópticas como sensores da luz emitida pelas descargas, instaladas no interior do tanque. Segundo Schwarz *et al.* (2008), este método é muito promissor para a detecção de *PDs* em transformadores a seco. No entanto, conforme exposto em Kumar *et al.* (2008), é de difícil aplicação em transformadores imersos em óleo, devido à opacidade do próprio líquido isolante. Tal fato, também, influencia diretamente na incapacidade de localização das *PDs*.

2.3.6 Método elétrico não-convencional

Este método emprega transformadores de corrente de alta frequência (*HFCTs* - *High Frequency Current Transformers*) como sensores da corrente elétrica injetada nos enrolamentos dos transformadores pelas *PDs*.

As medições são normalmente realizadas entre 300 *kHz* e 30 *MHz*, com os *HFCTs* instalados nas extremidades dos enrolamentos, isto é, nos terminais das buchas e do neutro do transformador, ou mesmo no cabo de aterramento, de forma a captarem a parcela dos pulsos de corrente de alta frequência que, após se propagarem nos enrolamentos desde o ponto de ocorrência das descargas parciais, atingem estes terminais.

Segundo Fuhr (2005), a sensibilidade de detecção é alta, principalmente para descargas ocorridas nas proximidades das espiras, como àquelas oriundas da degradação do isolamento sólido. Ainda, diversos trabalhos da literatura mostram que a localização das *PDs* pode ser realizada para este tipo de descarga, como em: James *et al.* (1989), Fuhr (2005), Naderi *et al.* (2007), Rahman *et al.* (2013), Velandy (2014), dentre outros.

Apesar da possibilidade de interferências e ruídos nas medições das *PDs* por *HFCTs*, Kane e Golubev (2010) efetivamente aplicaram esta técnica no monitoramento de *PDs* em transformadores de potência de grande porte *on-site/on-line*. Neste caso, o ruído foi identificado por meio de comparações das medições realizadas pelos *HFCT* com medições de outros sensores. Não obstante, técnicas de processamento digital de sinais e supressão de ruídos podem ser utilizadas para um mesmo propósito, bem como para sinais de *PDs* advindos de outras formas de medição, como no método acústico.

A Tabela 2.1 sintetiza as principais propriedades dos métodos utilizados na determinação das *PDs* em transformadores de potência. Pela tabela, e conforme discutido nesta Seção, pode-se notar que o método elétrico não-convencional (*HFCT*) reúne um melhor conjunto de características, principalmente no que se refere ao monitoramento e localização de *PDs* internas no enrolamento, como aquelas resultantes da degradação do isolamento sólido, in-

vestigadas neste trabalho. Os métodos UHF e acústico, em virtude, principalmente, das atenuações e distorções sofridas pelas ondas propagantes, apresentam melhor desempenho para descargas ocorridas diretamente no óleo do transformador (Fuhr, 2005; Rubio-Serrano *et al.*, 2012). Outrossim, uma menor quantidade de sensores é necessário na localização das PDs pelo método $HFCT$, em comparação aos métodos UHF e acústico.

Tabela 2.1: Características dos principais métodos utilizados na investigação de PDs em transformadores de potência.

Método	Sensor	Grandeza Física	Faixa de medição	Sensibilidade	On-site	On-line	Localização
Elétrico conv.	Capacitor	Corrente	$< 1MHz$	Alta	Não	Não	Não
DGA	-	Gases	-	Baixa	Sim	Não	Não
UHF	Antena	Onda Eletromag.	$0,5-1,5GHz$	Moderada	Sim	Sim	Imprecisa
Acústico	Piezoelétrico	Onda acústica	$\sim 40KHz$	Baixa	Sim	Sim	Sim
Óptico	Fibra-óptica	Luz	-	Baixa	Sim	Sim	Não
Elétrico não-conv.	$HFCT$	Corrente	$0,3-30MHz$	Alta	Sim	Sim	Sim

2.4 Técnicas para localização das PDs

Devido à complexidade estrutural dos transformadores de potência, a localização das regiões deterioradas do isolamento sólido ao longo dos enrolamentos, por meio da medição e análise da atividade de PDs , é uma tarefa importante, embora de difícil realização. Com a estimação do local de ocorrência destas descargas, a árdua e demorada inspeção visual em busca da região degradada do isolamento pode ser evitada, influenciando diretamente na redução do tempo e no custo de reparo do transformador. Em algumas situações, caso a localidade das PDs seja precisamente determinada, apenas uma desmontagem local do transformador pode ser recomendada, otimizando as atividades de manutenção do equipamento.

Uma vez que os métodos de detecção UHF e acústico apresentam reduzida sensibilidade para a localização de PDs ocorridas no interior dos enrolamentos, como aquelas advindas da degradação do isolamento sólido, o método elétrico não-convencional tem sido adotado, aplicado por meio de $HFCTs$ instalados nos terminais acessíveis do transformador, ou seja, nas extremidades dos enrolamentos (buchas e neutro/terra). Neste contexto, diversos trabalhos da literatura têm proposto e investigado técnicas para a localização das PDs . De modo geral,

as seguintes metodologias puderam ser identificadas: levantamento de curvas de predição do local de ocorrência das PDs ; análise da variação dos zeros das respostas em frequência dos sinais terminais; cálculo e comparação dos pulsos PD de entrada, por meio de funções de transferência do enrolamento; e comparação entre os sinais medidos com um conjunto de sinais de referência.

2.4.1 Curvas de interpolação

Nesta estratégia, determinadas características das respostas terminais das PDs são analisadas e utilizadas na aproximação de funções matemáticas, relacionadas com o local de ocorrência das descargas. Com isso, os pontos de ocorrência das PDs podem ser estimados por meio de simples interpolações matemáticas.

Em [James *et al.* \(1989\)](#) e [Mohamed e Lewin \(2009\)](#), a razão logarítmica entre as respostas terminais capacitivamente transferidas é utilizada no ajuste de retas de interpolação. Para tanto, a faixa de frequências na qual o enrolamento se comporta como uma rede capacitiva é determinada, por meio da análise da resposta em frequência de sinais de calibração, injetados e medidos nos dois terminais dos enrolamentos. A razão logarítmica destes sinais, na região capacitiva, determina dois pontos extremos que possibilitam o traçado de uma reta, capaz de estimar o local de ocorrência das PDs com precisão de até 5% da extensão do enrolamento, para enrolamentos com apenas uma camada. Contudo, para enrolamentos compostos de várias camadas, como aqueles normalmente existentes nos transformadores de potência, o método não pode ser aplicado, uma vez que a razão logarítmica entre as respostas terminais não apresenta um comportamento linear com relação ao comprimento do enrolamento. Tal fato foi anteriormente notado nos trabalhos de [Harrold e Sletten \(1970\)](#) e [Kallberg \(1980\)](#), sendo atribuído à presença dos acoplamentos capacitivos existentes entre as diferentes camadas do enrolamento. Logo, embora o método utilizado por [James *et al.* \(1989\)](#) para a localização das PDs seja de simples aplicação e preciso, o mesmo é válido apenas para enrolamentos que apresentem uma capacitância série equivalente muito maior que a capacitância paralela,

como os enrolamentos constituídos por poucas camadas.

Uma função linear entre a razão das energias dos sinais terminais é proposta em [Gui et al. \(2003\)](#) para a localização das PDs . Esta reta de interpolação é também traçada com base na injeção e medição de sinais de calibração nos terminais dos enrolamentos dos transformadores. Os resultados mostram que o local de ocorrência das PDs pode ser determinado com um erro máximo de 8%, com relação ao comprimento do enrolamento, para casos de simulação, e de aproximadamente 16% para casos reais. Todavia, neste trabalho, não é especificada a faixa de frequências utilizada no cálculo das energias dos sinais, bem como o tipo de enrolamento analisado. O mesmo método é também proposto no trabalho de [Wenzel et al. \(1994\)](#), visando contornar as dificuldades de obtenção de um conjunto de sinais de referência. Contudo, neste trabalho, a reta ajustada se mostra bem distante da real razão de energias dos sinais terminais, fato que proporcionará consideráveis erros na localização das PDs .

Em [Sarikhani et al. \(2007\)](#), a média e o desvio padrão dos coeficientes de detalhe nível 1 das transformadas *Wavelets* dos sinais terminais são utilizados na constituição de funções, variantes com o local de ocorrência das PDs . Uma combinação linear e exponencial dos parâmetros estatísticos considerados é realizada e os resultados mostram que as curvas ajustadas podem determinar o local de ocorrência das descargas com certa precisão.

2.4.2 Variação dos zeros da resposta em frequência

Esta técnica de localização das PDs foi inicialmente proposta em [Wang et al. \(1999\)](#) e utiliza as características de ressonância das respostas em frequência dos sinais terminais. Neste trabalho, é mostrado que as frequências dos zeros se alteram de acordo com a localização das PDs , apresentando valores maiores à medida que estas descargas se distanciam dos terminais de medição, enquanto as frequências dos pólos se mantêm constantes. À vista disso, [Hettiwatte et al. \(2002\)](#) propuseram uma comparação das frequências dos dois primeiros zeros para a determinação do local de ocorrência das descargas parciais, realizada entre uma resposta em frequência das PDs medidas nos terminais dos enrolamentos do transformador,

cujas localidades são desconhecidas, com um conjunto de respostas em frequência previamente obtidas, por meio de simulações de modelos do transformador com pulsos injetados em diversas posições do enrolamento. Embora as PDs possam ser corretamente localizadas, os resultados preliminares mostram a existência de uma região “cega” do enrolamento, onde os zeros da resposta em frequência dos sinais não podem ser observados.

Em [Hettiwatte e Wang \(2005\)](#) é mostrado que essa região “cega” pode atingir até 44% da extensão do enrolamento, isto é, quase metade do mesmo, para descargas similares às aquelas decorrentes da deterioração do isolamento, se encontrando nas proximidades da extremidade oposta onde a captação das PDs é realizada. Segundo os autores, quando a posição de ocorrência das PDs se aproxima desta extremidade do enrolamento, as frequências dos zeros se aproximam de um único valor, denominado frequência crítica do enrolamento.

É importante ressaltar que os trabalhos de [Wang et al. \(1999\)](#) e [Hettiwatte et al. \(2002\)](#) foram realizados em um transformador de enrolamento contínuo com apenas uma camada de espiras, enquanto o trabalho de [Hettiwatte e Wang \(2005\)](#) tomou como base um transformador de enrolamento contínuo com duas camadas. No entanto, em [Naderi et al. \(2007\)](#) é mostrado que os zeros das respostas em frequência terminais apresentam um mesmo comportamento para outras configurações de enrolamentos, inclusive com a presença da região “cega”, como nos enrolamentos formados por discos empilhados.

Em [Wang et al. \(2005\)](#), uma expressão matemática para a determinação da posição da PD é obtida, sendo dependente de alguns parâmetros de um circuito elétrico equivalente do enrolamento do transformador e das frequências dos zeros da resposta em frequência, variáveis estimadas por meio de sinais de calibração, injetados e medidos no terminal das buchas do transformador. Todavia, os resultados mostram que as posições de ocorrência das PDs podem ser precisamente estimadas em apenas 66% da extensão do enrolamento, aproximadamente. Os outros 34%, situados no final do enrolamento, com relação ao terminal de medição (bucha), se mostram como uma região “cega” para o método de localização.

2.4.3 Cálculo e comparação dos pulsos *PD* de entrada

Este método de localização é completamente dependente do conhecimento de diversas funções de transferência do enrolamento, entre pontos internos e os terminais de medição.

De acordo com [Akbari et al. \(2002\)](#), com o conhecimento dos sinais medidos nos terminais da bucha e do neutro do transformador, devido à ocorrência de uma *PD* no interior do enrolamento, e de funções de transferência entre determinado ponto interno e estes dois terminais, o sinal de entrada, ou seja, a forma de onda da descarga parcial no seu ponto de ocorrência, pode ser estimada de duas formas distintas. O par de funções de transferência que fornece os sinais de entrada com maior similaridade é então associado ao local de ocorrência da *PD*. Neste trabalho, os sinais de entrada estimados foram comparados por meio de Redes Neurais Artificiais (*ANNs* - *Artificial Neural Networks*), propiciando a localização das *PDs* com precisão de até 5% da extensão do enrolamento.

Em [Jafari e Akbari \(2007\)](#), este método de localização é aplicado visando contornar as dificuldades de localização das *PDs* pelas variações dos zeros das respostas em frequência terminais. Os resultados mostram um erro máximo de 8,4% na localização das *PDs*, com relação ao comprimento do enrolamento. Contudo, em trabalho posterior, [Jafari et al. \(2008\)](#) constataram que este método de localização pode apresentar erros de até 20% para *PDs* ocorridas nas regiões centrais do enrolamento.

2.4.4 Comparação entre formas de onda

As formas de onda dos sinais captados nos terminais dos enrolamentos, ou determinadas características das mesmas, devido as *PDs* ocorridas ao longo de sua extensão, são comparadas com um conjunto de formas de onda de referência, previamente obtidas e cujos pontos de ocorrência são conhecidos. A localização da *PD* de interesse é então estabelecida de acordo com o local do sinal de referência que mais se assemelha ao sinal medido.

Este método foi inicialmente proposto por [Austin e Marshall \(1978\)](#), que utilizaram o coeficiente de correlação cruzado como uma medida do grau de similaridade entre as formas de

onda, no tempo. O valor deste coeficiente se mostra máximo quando os locais de ocorrência do pulso medido e de um determinado pulso de referência são iguais, resultando em um considerável percentual de acertos na determinação do local de ocorrência das PDs , independentemente do tipo de enrolamento do transformador. Assim como no trabalho de [Austin e Marshall \(1978\)](#), [Jayalalitha e Jayashankar \(2006\)](#) empregaram o coeficiente de correlação entre formas de onda na localização das PDs , obtendo bons resultados também para sinais contaminados com ruído gaussiano. Em [Jeyabalan e Usa \(2009\)](#), no entanto, é verificado que a correlação de sinais no tempo não é capaz de estimar, precisamente, a localização de PDs com tempos de duração diferentes dos tempos dos pulsos utilizados na geração dos sinais de referência. Para contornar este problema, os autores propõem o cálculo da correlação entre sinais no domínio da frequência.

Em [Wenzel et al. \(1994\)](#), a comparação entre as formas de onda medidas e o conjunto de referência é realizado por meio da energia compartilhada entre estes sinais, ortogonalmente transformados pela transformada de Karhunen-Loève. Desta forma, o local de ocorrência da PD é determinado pela máxima energia relativa, obtida quando o local de ocorrência da descarga é o mesmo de um determinado sinal de referência, cuja localidade é conhecida.

Nos trabalhos de [Wenzel et al. \(1996\)](#), [Nafisi et al. \(2009\)](#) e [Rotby et al. \(2012\)](#), $ANNs$, previamente treinadas com o conjunto de sinais de referência, ou determinadas características do mesmo, são utilizadas na classificação dos pulsos PDs de acordo com o local de ocorrência. Em [Wenzel et al. \(1996\)](#) e [Nafisi et al. \(2009\)](#), as $ANNs$ são diretamente treinadas com as formas de onda de referência. Já em [Rotby et al. \(2012\)](#), alguns parâmetros estatísticos característicos dos sinais de referência são utilizados no treinamento das redes neurais. Em ambos os casos, o local de ocorrência das PDs puderam ser determinados adequadamente.

Diversas outras formas de comparação entre sinais de PDs medidos e sinais de referência, com o objetivo de se determinar a localização das PDs ao longo do enrolamento, foram encontrados na literatura, como em: [Eldery et al. \(2006\)](#), que comparam a densidade espectral dos sinais; [Jeyabalan \(2010\)](#), que verificam a diferença entre os ângulos e entre as

frequências de oscilação dos sinais; Jeyabalan (2011), que emprega a diferença entre os ângulos das componentes de fase e quadratura dos sinais; Jeyabalan e Usa (2011), que comparam o ângulo existente entre curvas de regressão ajustadas com os sinais; Nafar *et al.* (2011), que fazem o uso de transformações *Wavelets* nos sinais antes do cálculo da correlação entre os mesmos; Guillen *et al.* (2014) que empregam funções *Wavelet-Laplace* em conjunto com o cálculo da distância de Hellinger na comparação dos sinais; Homaei *et al.* (2014) que utilizam *ANNs* não supervisionadas, por meio de transformações ortogonais dos sinais medidos; Abd Rahman *et al.* (2016), que utilizam uma combinação linear de filtros digitais, com base em características *wavelets* e de componentes principais extraídas dos sinais de referência; e Guillen *et al.* (2016) que utilizam *Wavelets* em conjunto com o cálculo da divergência de *Kullbach-Leibler*. Em geral, em todos estes trabalhos avançadas técnicas de processamento de sinais são empregadas, propiciando bons resultados na localização das *PDs*.

2.4.5 Considerações sobre as técnicas de localização das *PDs*

Pelos trabalhos discutidos nesta Seção, pode-se constatar que diferentes estratégias têm sido propostas na localização das *PDs* ao longo dos enrolamentos dos transformadores de potência, sendo que alguns métodos apresentam significativo desempenho neste propósito, enquanto outros nem tanto. Algumas técnicas se mostram de maior complexidade e mais precisas, ao passo que outras, mais simples e com menor exatidão na estimação do local de ocorrência das descargas parciais.

De modo geral, as técnicas supracitadas necessitam, para a constituição da ferramenta de localização, ou da modelagem do transformador ou da realização de testes experimentais no levantamento de um conjunto de sinais de referência ou de funções de transferência do enrolamento. Ambas tarefas são de difícil realização, seja pelo não conhecimento das características construtivas do equipamento, normalmente necessárias nos modelos computacionais, ou pela inexistência de derivações nos enrolamentos para a injeção de sinais das *PDs* em experimentos. Entretanto, confrontando-se estas duas vertentes, a modelagem computacional

do transformador se mostra mais conveniente, uma vez que é mais fácil pesquisar, estimar ou até mesmo pressupor por características construtivas desconhecidas do equipamento do que realizar um procedimento invasivo para extração de derivações e injeção de sinais, ou mesmo do que desenvolver um protótipo equivalente para análises experimentais.

A maioria das estratégias da literatura apresenta técnicas de localização desenvolvidas e avaliadas apenas com dados de simulação computacional, enquanto outras trabalham exclusivamente com dados oriundos de procedimentos experimentais em protótipos. Poucos trabalhos, como em [Eldery et al. \(2006\)](#), [Naderi et al. \(2007\)](#), [Jafari e Akbari \(2007\)](#), [Jafari et al. \(2008\)](#) e [Jeyabalan \(2010\)](#) apresentaram técnicas de localização desenvolvidas com dados de simulação e aplicados em casos experimentais/reais. Tal procedimento possibilita avaliar o desempenho do método de localização para situações reais ou mais próximas da realidade, aumentando a credibilidade do mesmo.

Além dos aspectos destacados, a grande maioria dos métodos propostos na literatura apresentam aplicabilidade conhecida apenas para os enrolamentos *disk-type*, não sendo avaliadas para os enrolamentos em configurações *layer-type* que também são empregados nos transformadores de potência.

2.5 Geração experimental de pulsos das PDs

Via de regra, três diferentes formas de geração/simulação experimental dos pulsos de corrente das PDs têm sido utilizadas na literatura para o estudo destas descargas, principalmente no que tange às suas localizações nos enrolamentos de transformadores.

A ruptura dielétrica em arranjos externos de eletrodos em configurações ponta-plano, envolvendo ou não amostras do isolamento, é empregada na maioria dos trabalhos, como em [Jafari e Akbari \(2007\)](#), [Naderi et al. \(2008\)](#), [Li et al. \(2009\)](#), [Cavallini et al. \(2010\)](#), [Okabe et al. \(2010\)](#), [Kiiza et al. \(2014\)](#), [Abd Rahman et al. \(2016\)](#), dentre outros. Neste caso, os arranjos são submetidos a uma tensão externa, elevada até o nível em que as descargas parciais se manifestam, podendo tais pulsos ser injetados em derivações de um enrolamento para

avaliação de sua propagação. Uma das vantagens deste método é a possibilidade de avaliação da natureza das *PDs* para diferentes tipos de defeitos no isolamento sólido, como a presença de bolhas, partículas metálicas e *PDs* superficiais ou internas. No entanto, ainda que pulsos de corrente semelhantes àqueles das *PDs* decorrentes da degradação do isolamento sólido possam ser obtidos, com tempos de subida da ordem de algumas dezenas de nanossegundos, a magnitude destas descargas não pode ser facilmente controlada, sendo difícil a geração de pulsos com magnitudes relativas às *PDs* em condições ainda iniciais da falha como, por exemplo, para descargas com intensidades inferiores a $\sim 10000 \text{ pC}$, valor estabelecido por [Okabe et al. \(2010\)](#) como causador de pequenas erosões macroscópicas no papel isolante.

Em [Naderi et al. \(2007\)](#) e [Homaei et al. \(2014\)](#), calibradores comerciais e padronizados de *PDs* são utilizados, possibilitando a criação e injeção de pulsos de corrente com tempos de subida e magnitudes controláveis. Estes dispositivos, normalmente, se baseiam nos princípios empregados em circuitos geradores de impulsos, por meio do descarregamento em cascata de capacitores. Apesar de proporcionarem a criação de pulsos de corrente mais condizentes às *PDs* iniciais da degradação do isolamento sólido, tais equipamentos nem sempre estão disponíveis em laboratórios de pesquisa, sendo muitas vezes de aquisição inviável.

No trabalho de [Jeyabalan e Usa \(2009\)](#), um simples gerador de sinais/funções arbitrárias é empregado na geração das *PDs*. Não obstante, além do fato de que este dispositivo não seja adequado na geração de sinais com potência aplicável em casos reais, os pulsos gerados apresentaram duração de $5 \mu\text{s}$, tempo bastante superior ao das *PDs* características das falhas no sistema sólido isolante de transformadores.

2.6 Considerações do Capítulo

Uma revisão da literatura ligada ao tema deste trabalho foi realizada neste Capítulo.

Inicialmente, os principais trabalhos referentes aos mecanismos de evolução da falha no isolamento sólido dos transformadores de potência, desde sua origem até o colapso da isolação e estabelecimento de um curto-circuito, foram tratados, podendo-se notar que o surgi-

mento ou aumento da atividade de Descargas Parciais (PDs) é uma etapa sempre presente e que pode ser utilizada na identificação antecipada da degradação do sistema sólido isolante, principal responsável pelas falhas nos enrolamentos.

Em seguida, foram abordados as principais formas de medição das PDs nos transformadores de potência, onde foi destacado que o uso de transformadores de corrente de alta frequência ($HFCTs$), instalados nos terminais acessíveis da bucha e do neutro/terra destes equipamentos (extremidades dos enrolamentos), representa uma forma mais adequada para identificação e localização das falhas no isolamento sólido.

Então, as principais técnicas propostas e utilizadas na localização das PDs ao longo dos enrolamentos foram examinadas, onde se constata que um método simplificado, desenvolvido utilizando apenas sinais advindos de simulações computacionais, e capaz de estimar adequadamente a localização das PDs em ambos os tipos de configurações de enrolamentos dos transformadores, em casos reais, não existe na literatura. Com o intuito de satisfazer tais propósitos, neste trabalho é avaliado o uso da Regressão Linear Múltipla (MLR), técnica ainda não investigada na localização das PDs .

Por fim, foram apresentados os principais meios utilizados na geração de sinais experimentais das PDs , onde pode-se notar a existência de algumas limitações na geração dos pulsos de corrente destas descargas em condições incipientes, seja por impossibilidade da técnica de geração ou por aquisição inviável de equipamento. Neste sentido, neste trabalho, é proposta uma nova forma para a obtenção experimental de sinais terminais de alta frequência similares às PDs , por meio da realização de descargas capacitivas em derivações dos enrolamentos. Com estes sinais, o desempenho dos modelos de regressão desenvolvidos para a localização das PDs pode ser avaliado para sinais mais próximos da realidade destas descargas.

CAPÍTULO 3

ASPECTOS TEÓRICOS

3.1 Introdução

Os conceitos envolvidos neste trabalho e utilizados no desenvolvimento de modelos de Regressão Linear Múltipla para a localização de PDs no isolamento sólido dos transformadores de potência são discutidos neste Capítulo. Em um primeiro momento será abordada uma estratégia para a modelagem dos enrolamentos dos transformadores, frente à ocorrência das descargas parciais, propiciando a obtenção de sinais computacionais para a obtenção dos modelos localizadores. Então, a extração de características será tratada, etapa indispensável no desenvolvimento de métodos de classificação/localização de sinais. Por fim, a modelagem por Regressão Linear Múltipla é apresentada, assim como a avaliação destes tipos de modelos pelas análises de variâncias e dos resíduos, e um método de ajuste em etapas (*Stepwise*).

3.2 A modelagem MTL de enrolamentos

Considerando que as medições das PDs ocorridas no isolamento sólido deteriorado dos transformadores de potência sejam realizadas nas extremidades de seus enrolamentos (buchas e neutros) por meio de $HFCTs$, uma das principais formas de se estudar os mecanismos de propagação dos pulsos de corrente destas descargas refere-se à modelagem apropriada do

transformador. Com isso, respostas terminais para *PDs* injetadas em diversos locais ao longo do enrolamento podem ser computacionalmente simuladas e analisadas.

Diante das elevadas frequências associadas à ocorrência das descargas parciais, cujos tempos de subida são da ordem de algumas dezenas de nanosegundos, a natureza distribuída dos enrolamentos dos transformadores deve ser considerada na modelagem dos mesmos. Nestas frequências, o comprimento de onda das correntes das descargas parciais se aproxima do comprimento elétrico do enrolamento, ocasionando então, além de uma dependência temporal, uma dependência espacial na propagação dos pulsos das *PDs*.

Pela literatura consultada, pôde-se constatar que a abordagem por múltiplas linhas de transmissão acopladas (*MTL* - *Multiple-conductor Transmission Line*) se mostra adequada e tem sido bastante empregada na simulação computacional dos pulsos de corrente de alta frequência das *PDs*, como nos trabalhos de [Hettiwatte et al. \(2002\)](#), [Jafari e Akbari \(2007\)](#), [Naderi et al. \(2007\)](#), [Popov et al. \(2007\)](#), [Hosseini et al. \(2008\)](#), [Hosseini e Baravati \(2017\)](#), dentre outros.

Na modelagem *MTL*, cada espira do enrolamento é considerada como sendo uma linha de transmissão, como ilustrado na Figura (3.1) onde m é o total de espiras/linhas, $V_S(i)$ e $I_S(i)$ as tensões e correntes de cada linha i no lado emissor e $V_R(i)$ e $I_R(i)$ as tensões e correntes no lado receptor (oposto).

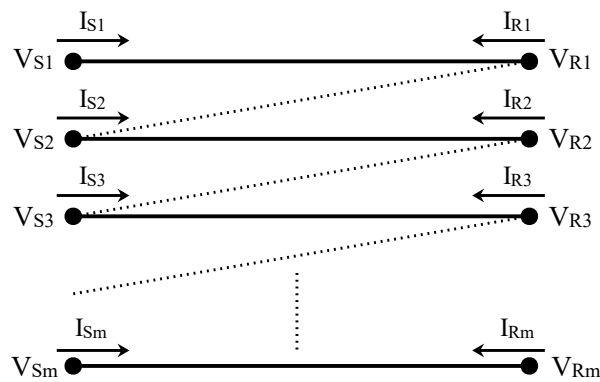


Figura 3.1: Espiras do enrolamento como linhas de transmissão acopladas.

De acordo com [Paul \(2008\)](#), as tensões (V) e correntes (I) em qualquer ponto z das linhas

podem ser descritas pelas equações de onda, conforme Equações em (3.1), sendo $\mathbf{Z}$ a matriz de impedâncias do sistema e $\mathbf{Y}$ a matriz de admitâncias. Para uma incorporação direta das perdas elétricas nos condutores e no sistema isolante, por conveniência, estas equações são representadas no domínio da frequência, embora o termo w esteja subentendido.

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{V}(z) = \mathbf{ZYV}(z), \quad (3.1a)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \mathbf{I}(z) = \mathbf{YZI}(z). \quad (3.1b)$$

Para a resolução das $2m$ Equações em (3.1) é necessário desacoplar o sistema, fato que pode ser realizado por meio de uma mudança de variáveis por quantidades modais e pela aplicação de transformações de similaridade (Paul, 2008). Aplicando tais conceitos e considerando apenas os terminais emissor e receptor das linhas, obtém-se o sistema de Equações em (3.2), que expressa as correntes terminais de cada linha em termos das tensões. Nestas equações γ e $\mathbf{T}_v$ são as matrizes dos autovalores e autovetores de $\sqrt{\mathbf{ZY}}$ que desacoplam (3.1), respectivamente, e l é o comprimento médio das linhas/espiras.

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

onde:

$$A = \mathbf{YT}_v \gamma^{-1} \coth(\gamma l) \mathbf{T}_v^{-1}, \quad (3.3)$$

$$B = \mathbf{YT}_v \gamma^{-1} \operatorname{cosech}(\gamma l) \mathbf{T}_v^{-1}. \quad (3.4)$$

3.2.1 Inserção das *PDs* na *MTL*

De acordo com Hettiwatte *et al.* (2002), e conforme realizado nos trabalhos de Jafari e Akbari (2007), Naderi *et al.* (2007) e Hosseini e Baravati (2017), para a aplicação da modelagem *MTL* na simulação de *PDs* ocorridas ao longo dos enrolamentos de transformadores,

antes da incorporação das condições de fronteira das espiras no sistema de Equações em (3.2), a condição de fronteira da espira $p - 1$, sendo p o ponto de ocorrência da *PD* (excitação), deve ser modificada, propiciando a injeção do pulso de corrente da descarga parcial (I_{PD}). Deste modo, na resolução da *MTL* com a consideração das *PDs*, as condições de fronteira (3.5) - (3.7) devem ser utilizadas:

$$I_R(i) = -I_S(i + 1), \text{ para } i = 1 \text{ até } m \text{ e } i \neq p, \quad (3.5)$$

$$V_R(i) = V_S(i + 1), \text{ para } i = 1 \text{ até } m \text{ e } i \neq p, \quad (3.6)$$

$$I_R(p - 1) + I_S(p) = I_{PD}(i + 1), \text{ se } i = p. \quad (3.7)$$

Aplicando as condições de fronteira (3.5) - (3.7) na Equação (3.2) e simplificando o sistema matricial resultante, por meio da adição de linhas e colunas que se tornam redundantes e uma inversão matricial, o sistema de Equações em (3.8), em que T é a matriz procedente da simplificação, pode ser obtido.

$$\begin{bmatrix} V_S(1) \\ V_S(2) \\ \vdots \\ V_S(p-1) \\ V_S(p) \\ V_S(p+1) \\ \vdots \\ V_S(m) \\ V_R(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_S(1) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_{PD} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_R(m) \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Uma vez que em situações práticas apenas as extremidades dos enrolamentos estão acessíveis, onde os sensores (*HFCTs*) para a captação dos pulsos de corrente das *PDs* são normalmente instalados, somente as correntes $I_S(1)$ e $I_R(m)$ são de interesse, relativas às

correntes resultantes da *PD* no terminal da primeira e última espiras do enrolamento, respectivamente.

Expandindo-se as primeiras e últimas linhas do sistema de Equações em (3.8) e considerando que o enrolamento tenha impedâncias terminais Z_f no terminal de alimentação (primeira espira) e Z_t no terminal aterrado (última espira), as funções de transferência entre os p pontos de ocorrência das *PDs* e estas extremidades do enrolamento podem ser obtidas, como mostrado nas Equações (3.9) e (3.10). Para tanto, foi considerado que o enrolamento é alimentado por uma tensão senoidal, de modo que $V_S(1) = 1$ na frequência, e que a última espira do enrolamento esteja aterrada, com $V_R(m) = 0$.

$$TF_L = \frac{I_S(1)}{I_{PD}} = \frac{T(1,p)[Z_t + T(m+1,m+1)] - T(1,m+1)T(m+1,p)}{T(1,m+1)T(m+1,1) - T(1,1)[Z_t + T(m+1,m+1)] - Z_f[Z_t + T(m+1,m+1)]}, \quad (3.9)$$

$$TF_N = \frac{I_R(m)}{I_{PD}} = \frac{-T(m+1,1)TF_L - T(m+1,p)}{Z_t + T(m+1,m+1)}. \quad (3.10)$$

Com as funções de transferência do enrolamento (eqs. (3.9) e (3.10)), que são completamente determinadas pelas matrizes de impedância e admitância do mesmo (e consequentemente pela matriz T), e conhecendo-se a forma de onda do pulso *PD* de entrada, os pulsos de corrente nas extremidades do enrolamento podem ser obtidos, no domínio da frequência.

3.2.2 Parâmetros para a modelagem *MTL*

Para a simulação *MTL* de enrolamentos de transformadores, as matrizes de capacitâncias (C), indutâncias (L), resistências (R) e condutâncias (G) dos mesmos devem ser determinadas. Com isso, as matrizes Z e Y podem ser obtidas de acordo com as Equações (3.11) e (3.12), respectivamente, sendo w a frequência angular.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + jw\mathbf{L}, \quad (3.11)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + jw\mathbf{C}. \quad (3.12)$$

As matrizes $\mathbf{C}$ e $\mathbf{L}$ representam, basicamente, os caminhos elétricos existentes nos enrolamentos para a propagação dos pulsos de alta frequência das *PDs*, sendo os caminhos capacitivos dominantes. As matrizes $\mathbf{R}$ e $\mathbf{G}$ representam as perdas elétricas durante a propagação das *PDs*, por efeito Joule nos condutores e por polarização nos meios isolantes, respectivamente, as quais variam com a frequência.

De acordo com Jafari e Akbari (2007), para um transformador de potência com enrolamentos de discos empilhados (*disk-type*), similar aquele ilustrado na Figura (2.1), os principais acoplamentos capacitivos que devem ser considerados na modelagem *MTL* são: i) capacitâncias entre espiras adjacentes (C_e), cujo dielétrico é constituído, principalmente, pelo papel impregnado com óleo; ii) capacitâncias entre espiras de discos vizinhos (C_d), cujo material dielétrico é composto pelo óleo isolante, circulante nos dutos, e pela madeira ou papel prensado, utilizada na formação dos mesmos; iii) capacitâncias entre espiras dos enrolamentos *AT* e *BT* (C_E), com dielétrico composto pelo óleo isolante e pela barreira de papel prensado; iv) capacitâncias entre as espiras mais internas do enrolamento *BT* e o núcleo (aterrado) (C_t), nas quais o papel e o óleo são os principais meios dielétricos; e v) capacitâncias entre as espiras mais externas do enrolamento *AT* e o tanque do transformador (também aterrado) (C_T), cujo principal dielétrico existente é o óleo isolante. Nos enrolamentos compostos por camadas de espiras contínuas (*layer-type*), além das capacitâncias C_e , C_E , C_t e C_T , se mostra presente uma capacitância entre espiras de camadas vizinhas (C_c), com dielétrico composto pelo papel impregnado com óleo. Neste caso, como o enrolamento não é subdividido em discos, não aparece a capacitância C_d . Ainda, como este tipo de configuração é empregada em transformadores de menor potência e em transformadores de distribuição, a capacitância C_e normalmente possui verniz isolante como meio dielétrico (Popov et al., 2007).

As Figuras 3.2 e 3.3 exibem, nesta ordem, os principais acoplamentos capacitivos existentes nos enrolamentos *disk-type* e *layer-type* de transformadores, ilustrados com condutores de seção reta retangular e circular, respectivamente. Nas elevadas frequências associadas à ocorrência das *PDs*, essas capacitâncias se apresentam como caminhos de mais baixa impedância, conduzindo assim a maior parcela da corrente injetada nos enrolamentos pelas descargas.

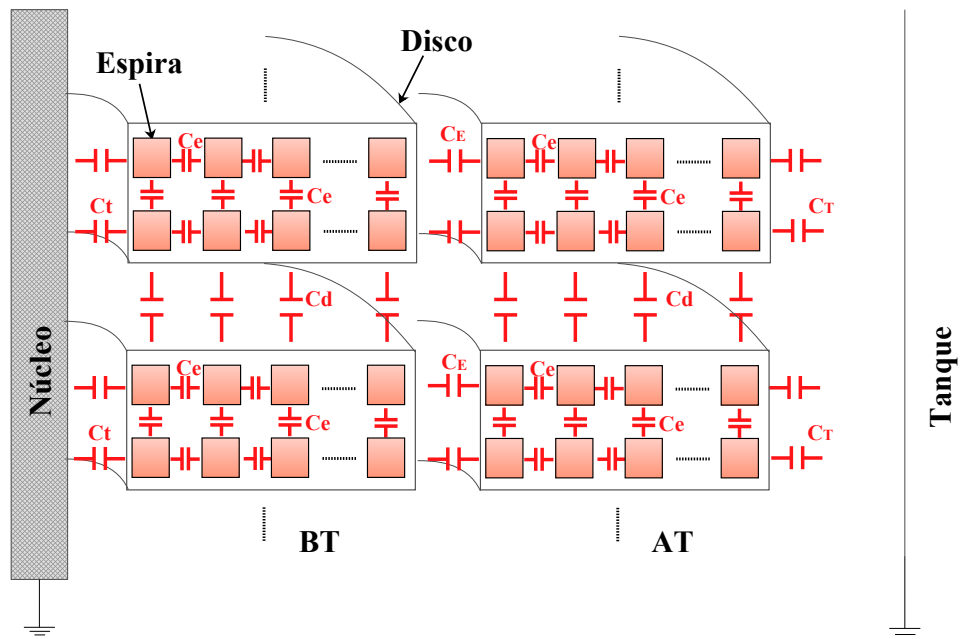


Figura 3.2: Principais acoplamentos capacitivos existentes nos enrolamentos *disk-type*.

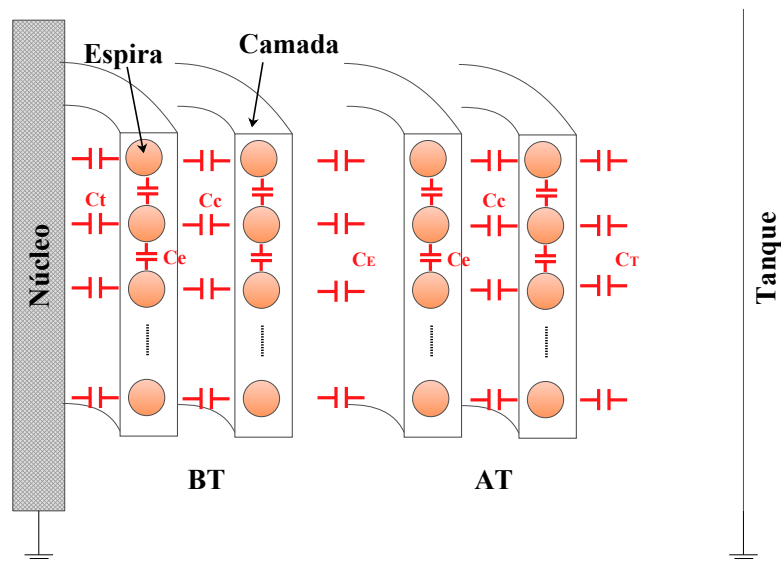


Figura 3.3: Principais acoplamentos capacitivos existentes nos enrolamentos *layer-type*.

De modo geral, os valores dos parâmetros capacitivos podem ser aproximados por meio de simples equações analíticas, considerando clássicas configurações de capacitores. Entretanto, caso seja necessária uma determinação mais precisa, técnicas de elementos finitos podem ser empregadas.

A forma utilizada na estimação dos valores de capacitâncias deste trabalho, assim como das indutâncias, resistências e condutâncias, e constituição das matrizes correspondentes, serão tratadas e ilustradas no Capítulo 5.

3.3 Extração de características de sinais

Uma etapa fundamental na classificação de sinais, como a classificação dos pulsos das *PDs* quanto aos seus locais de ocorrência, está relacionada à extração de características adequadas para uma separação efetiva destes sinais em suas distintas classes, isto é, na determinação de atributos mais representativos para a sua distinção quanto aos pontos de ocorrência das descargas.

Segundo [Fukunaga \(1990\)](#), a extração de características pode ser considerada como um processo de mapeamento dos sinais em atributos mais efetivos e adequados para o processo de classificação. Desta forma, de acordo com [Webb \(2002\)](#), a extração de características atua de forma a remover a informação redundante ou irrelevante dos sinais, reduzindo a dimensão dos dados e transformando-os em uma forma mais apropriada para o emprego das estratégias de classificação.

De acordo com [Sahoo et al. \(2005\)](#), [Raymond et al. \(2015\)](#) e [Wu et al. \(2015\)](#), as seguintes características são normalmente utilizadas na classificação das *PDs*: parâmetros estatísticos, como o cálculo da média, variância, *skewness* e *kurtosis*; características de tempo, como a determinação dos tempos de subida e descida dos pulsos; propriedades na frequência, como as componentes do espectro de frequências obtido pela transformada de Fourier; parâmetros de *Wavelets*, como os coeficientes advindos desta transformada; características ortogonais, como os coeficientes resultantes da análise de componentes principais (transformada de *Karhunen-*

Loève) ou da transformada de *Haar and Walsh*; aspectos fractais; características baseadas na teoria do caos, dentre outras.

Das técnicas empregadas na literatura para a extração de características das *PDs*, aquela baseada no cálculo de parâmetros estatísticos se mostra de maior simplicidade e rapidez de obtenção. Embora alguns autores considerem que o cálculo de valores estatísticos seja mais adequado para diagramas *Phase Resolved* das *PDs*, onde a atividade destas descargas é exposta como o número de registros pela fase de ocorrência, aplicações diretamente nas formas de onda captadas também propiciam bons resultados na classificação, como verificado nos trabalhos de [Kuo \(2010\)](#), [Rotby et al. \(2012\)](#) e [Darabad et al. \(2013\)](#).

A média, o desvio padrão, a *skewness* e a *kurtosis* de um determinado sinal s , composto por N amostras, podem ser calculadas de acordo com as Equações (3.13) - (3.16), respectivamente:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, \quad (3.13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - \mu)^2}, \quad (3.14)$$

$$sk = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(s_i - \mu)^3}{\sigma^3}, \quad (3.15)$$

$$ku = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(s_i - \mu)^4}{\sigma^4}. \quad (3.16)$$

Os parâmetros estatísticos definidos nas equações acima representam os 4 principais momentos centrais da estatística, isto é, momentos em torno da média, sendo esta o primeiro momento ([Ryan, 2009](#)). O segundo momento central é a variância (σ^2), que mensura o grau de desvio da média. A *skewness* constitui o terceiro momento central, que representa uma medida da assimetria de uma distribuição com relação à distribuição normal. A *kurtosis*

representa o quarto momento, fornecendo uma medida do grau de achatamento de uma distribuição com relação à distribuição normal.

De forma a complementar as características estatísticas, uma vez que as intensidades dos sinais terminais das *PDs* estão diretamente relacionados com os locais de ocorrência destas descargas ao longo dos enrolamentos, o cálculo das energias destes sinais e de suas cargas aparentes, conforme Equações 3.17 e 3.18, pode também ser utilizado.

$$E = \sum_{i=1}^N |s_i|^2, \quad (3.17)$$

$$Q_{ap} = \int_0^t s \partial t. \quad (3.18)$$

Outra maneira empregada na literatura na extração de características se refere à Análise de Componentes Principais (*PCA* - *Principal Component Analysis*).

A *PCA* é um procedimento matemático que, por meio de uma transformação ortogonal, dissocia o conjunto de N observações dos sinais em um reduzido número de componentes, capazes de explicar a variabilidade dos dados. O número de componentes resultante é menor ou igual ao número de variáveis analisadas (dimensões), estando organizadas em ordem decrescente de variância (importância), sob a condição de ortogonalidade (Webb, 2002).

Como exposto em Shlens (2014), a *PCA* pode ser facilmente aplicada por meio do cálculo da matriz de covariâncias das variáveis, com sequente decomposição em autovetores e autovalores, ou decomposição em valores singulares. A Figura 3.4 ilustra o efeito da decomposição de um conjunto de observações (pontos) em duas componentes principais (PC_1 e PC_2), que são ortogonais e expressam a variabilidade dos dados.

3.4 Regressão Linear Múltipla

A Regressão Linear é uma técnica estatística para a investigação e modelagem da relação existente entre as variáveis de um sistema, onde o principal objetivo é obter uma relação

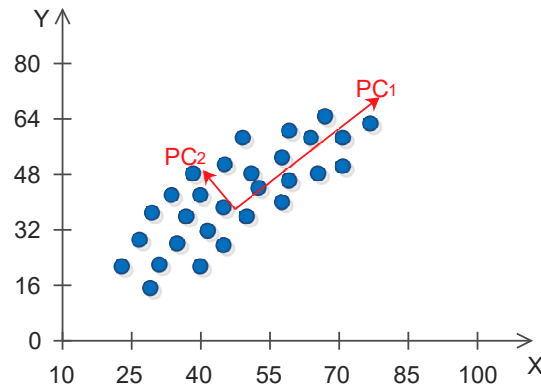


Figura 3.4: Efeito da extração de características pela *PCA*.

funcional aproximada entre uma determinada resposta de interesse, ou determinada saída deste sistema, e um conjunto de variáveis independentes, formado por variáveis de entrada do mesmo. Quando mais de uma variável independente está envolvida na análise de regressão, esta é denominada Regressão Linear Múltipla (*MLR - Multiple Linear Regression*).

Segundo [Montgomery et al. \(2006\)](#), a *MLR* pode ser a técnica estatística mais largamente utilizada, com emprego em quase todos os campos do conhecimento, como em engenharia, ciências químicas e físicas, economia, ciências biológicas e da vida, ciências sociais, dentre outras. Na grande maioria destas aplicações, a relação existente entre as variáveis dependentes (saídas) e independentes (entradas) é desconhecida, como ilustrado na Equação (3.19), onde y representa uma determinada saída de interesse, ξ um conjunto de k variáveis de entrada e ϵ possíveis fontes de variação, como erros de medição, falta de convergência numérica ou até mesmo erros de modelagem.

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \epsilon. \quad (3.19)$$

As variáveis independentes $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ são usualmente chamadas de variáveis naturais do sistema, uma vez que são expressas em unidades de medidas naturais como em Volts (V), Amperes (A), etc. Entretanto, na maioria dos problemas, é conveniente transformar estas grandezas em variáveis codificadas $x_1, x_2, \dots, x_k$, que são variáveis adimensionais, com média zero e mesmo desvio padrão, que facilitam a interpretação da análise de regressão e

evitam alguns problemas com o mau-condicionamento ou a singularidade das matrizes envolvidas nesta análise, que serão definidas adiante. Deste modo, a Equação (3.19) pode ser reescrita em termos das variáveis codificadas de acordo com a Equação (3.20):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon. \quad (3.20)$$

Conforme exposto em [Montgomery e Myers \(1995\)](#) e [Montgomery e Runger \(2011\)](#), a relação funcional $f(\cdot)$ existente entre as variáveis de entrada e uma determinada saída é normalmente aproximada por polinômios de baixa ordem. De modo geral, modelos polinomiais de primeira e segunda ordens, definidos nas Equações (3.21) e (3.22), respectivamente, podem ser empregados na maioria das aplicações. Nestas equações, os termos β representam os coeficientes dos modelos, que são desconhecidos e geralmente estimados pelo método dos mínimos quadrados ([Montgomery *et al.*, 2006](#)).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon, \quad (3.21)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon. \quad (3.22)$$

3.4.1 Método dos mínimos quadrados

Para a utilização deste método na estimação dos coeficientes dos modelos *MLR* polinomiais, $n > k$ observações do sistema são necessárias, ou seja, n medições das k variáveis naturais de entrada ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$) e da variável de saída de interesse (y) do sistema, que serão utilizadas na sua modelagem, devem ser previamente obtidas.

Considerando que um conjunto de n observações do sistema esteja disponível, isto é, $(\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{ik}, y_i)$ para $i = 1, 2, \dots, n$ e $n > k$, e que estas observações tenham sido codificadas para $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, y_i)$, o modelo de primeira ordem da Equação (3.21) pode ser escrito conforme a Equação (3.23):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.23)$$

Em termos matriciais, agrupando as observações de cada variável, a Equação (3.23) pode ser reescrita como na Equação (3.24):

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad (3.24)$$

onde:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}.$$

O método dos mínimos quadrados atua de forma a encontrar o melhor ajuste para as n observações do sistema, de modo a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre valores estimados pelo modelo e os dados observados, ou seja, de forma a minimizar os resíduos (erros) de modelagem. Logo, no método dos mínimos quadrados, deseja-se encontrar um vetor de coeficientes $\boldsymbol{\beta}$, ou estimadores de mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos L da Equação (3.25):

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \boldsymbol{\epsilon}'\boldsymbol{\epsilon}. \quad (3.25)$$

Isolando $\boldsymbol{\epsilon}$ na Equação (3.24) e substituindo este resultado em (3.25), obtém-se (3.26), que pode ser expandida de acordo com a Equação (3.27):

$$L = \boldsymbol{\epsilon}'\boldsymbol{\epsilon} = (\mathbf{y} - \mathbf{x}\boldsymbol{\beta})'(\mathbf{y} - \mathbf{x}\boldsymbol{\beta}), \quad (3.26)$$

$$L = \mathbf{y}'\mathbf{y} - \mathbf{y}'\mathbf{x}\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{x}\boldsymbol{\beta}. \quad (3.27)$$

Uma vez que $\beta'x'y$ e sua transposta $(\beta'x'y)' = y'x\beta$ são escalares de igual valor, estas parcelas se cancelam e a Equação (3.27) reduz-se à forma mostrada na Equação (3.28):

$$L = y'y - 2\beta'x'y + \beta'x'\beta. \quad (3.28)$$

Como o método dos mínimos quadrados estima os coeficientes do modelo de forma a minimizar a soma dos quadrados dos erros (L), no mesmo, deve-se determinar o vetor β que minimiza a Equação (3.28). Para tanto, faz-se uso dos testes das derivadas primeira e segunda do cálculo analítico, os quais estabelecem as condições necessárias para a determinação dos pontos críticos de uma função em determinados intervalos, ou seja, dos pontos de mínimo/máximo desta função (Leithold, 1994). De acordo com estes testes, para a obtenção da condição de mínimo, deve-se diferenciar a Equação (3.28) com relação a β e igualar a expressão resultante a zero, como mostrado em (3.29) que, simplificando, origina a Equação (3.30):

$$\frac{\delta L}{\delta \beta}|_{\beta} = -2x'y + 2x'x\beta = 0, \quad (3.29)$$

$$x'x\beta = x'y. \quad (3.30)$$

Multiplicando ambos os lados da Equação (3.30) por $(x'x)^{-1}$, obtêm-se os estimadores de mínimos quadrados do vetor β , denominado b , conforme mostrado na Equação (3.31):

$$b = (x'x)^{-1}x'y. \quad (3.31)$$

Assim, para estimar os coeficientes de um modelo *MLR* de primeira ordem para um determinado sistema, como àquele mostrado na Equação (3.21), basta calcular a matriz b dos estimadores de mínimos quadrados da Equação (3.31) a partir de n observações deste sistema, devidamente organizadas conforme as estruturas das matrizes x de dados de entrada e y de dados de saída da Equação (3.24).

Embora a Equação (3.31) para o cálculo dos estimadores de mínimos quadrados tenha sido determinada a partir da equação geral do modelo *MLR* de primeira ordem, a mesma é válida também para determinar os coeficientes de modelos *MLR* de segunda ordem. Neste caso, as matrizes β e x envolvidas possuem estruturas semelhantes às ilustradas nas matrizes das Equações (3.32) e (3.33), respectivamente.

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 & \beta_1 & \cdots & \beta_k & \beta_{11} & \cdots & \beta_{kk} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1k} & \beta_{23} & \cdots & \beta_{2k} & \cdots & \beta_{(k-1)k} \end{bmatrix}', \quad (3.32)$$

$$x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} & x_{11}^2 & \cdots & x_{1k}^2 & x_{11}x_{12} & \cdots & x_{11}x_{1k} & x_{12}x_{13} & \cdots & x_{12}x_{1k} & \cdots & x_{1(k-1)}x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} & x_{21}^2 & \cdots & x_{2k}^2 & x_{21}x_{22} & \cdots & x_{21}x_{2k} & x_{22}x_{23} & \cdots & x_{22}x_{2k} & \cdots & x_{2(k-1)}x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nk} & x_{n1}^2 & \cdots & x_{nk}^2 & x_{n1}x_{n2} & \cdots & x_{n1}x_{nk} & x_{n2}x_{n3} & \cdots & x_{n2}x_{nk} & \cdots & x_{n(k-1)}x_{nk} \end{bmatrix}. \quad (3.33)$$

Com os coeficientes do modelo *MLR* determinados, isto é, os estimadores de mínimos quadrados (b), estimativas para a saída do sistema, a partir de dados de entrada x , podem ser realizadas de acordo com a Equação (3.34):

$$\hat{y} = xb. \quad (3.34)$$

3.4.2 Análise de Variância

A Análise de Variância (*ANOVA* - *AN*alysis *Of* *VA*riance) é uma técnica estatística desenvolvida por Fisher (1925), que permite avaliar a significância de um modelo *MLR*. Como indicado pelo próprio nome, no contexto da modelagem *MLR*, o procedimento *ANOVA* analisa a variação de uma determinada resposta, atribuindo porções desta variação a cada uma das variáveis independentes (Wackerly et al., 2008). Assim, a *ANOVA* permite demonstrar

quais são os fatores que realmente produzem efeitos significativos na resposta de um determinado sistema, ou seja, determina quais variáveis possuem maior influência na resposta deste sistema e que devem, de fato, ser consideradas no modelo.

De acordo com [Montgomery e Myers \(1995\)](#) e [Wackerly *et al.* \(2008\)](#), a *ANOVA* é baseada na decomposição em soma de quadrados¹ e nos graus de liberdade² associados à variável resposta y , sendo testes estatísticos como o teste- F e o teste- t empregados na avaliação de duas hipóteses: H_0 , que é chamada de hipótese nula e avalia a ausência de um determinado efeito; e H_1 , que é chamada de hipótese alternativa e é oposta à hipótese nula.

A seguir são apresentados os principais testes e procedimentos realizados na *ANOVA*, sendo que um determinado nível de significância α deve ser previamente definido para a realização dos testes estatísticos. Tal valor representa um patamar de erro admitido para uma possível rejeição equivocada da hipótese nula H_0 .

3.4.2.1 Teste para a significância da regressão

Este teste permite avaliar se pelo menos uma das variáveis regressoras $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ utilizadas na modelagem contribui significativamente para o modelo *MLR* ajustado. Deste modo, as hipóteses analisadas são descritas na Equação (3.35):

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (3.35)$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \quad j = 1, 2, \dots, k$$

Segundo [Montgomery e Myers \(1995\)](#), para rejeitar a hipótese nula (H_0), isto é, verificar se pelo menos uma das variáveis regressoras é importante na modelagem de uma dada resposta, calcula-se o parâmetro F_0 estatístico do modelo *MLR* desenvolvido, de acordo com a Equação (3.36), e compara-se o mesmo com um valor associado na tabela da distribuição

¹De certo modo, uma representação do desvio da média para determinado fator.

²Número de informações independentes disponível para o cálculo de certa estatística ([Walpole *et al.*, 2012](#)).

estatística F de Fisher-Snedecor.

$$F_0 = \frac{SQ_r/k}{SQ_e/(n-k-1)}. \quad (3.36)$$

Na Equação (3.36), SQ_r representa a soma dos quadrados devido à regressão e SQ_e a soma dos quadrados devido ao erro, que podem ser calculados de acordo com as Equações (3.37) e (3.38), respectivamente:

$$SQ_r = \mathbf{b}'\mathbf{x}'\mathbf{y} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}, \quad (3.37)$$

$$SQ_e = \mathbf{y}'\mathbf{y} - \mathbf{b}'\mathbf{x}'\mathbf{y}. \quad (3.38)$$

No teste para a significância da regressão de um modelo MLR , se o valor F_0 calculado for maior que aquele associado na tabela da distribuição F , considerando o nível de significância α adotado, k graus de liberdade para o numerador e $n - k - 1$ graus de liberdade para o denominador, a hipótese nula é rejeitada. Assim, pode-se estatisticamente afirmar que pelo menos uma das variáveis regressoras utilizadas na modelagem contribui significativamente para o modelo em questão.

Por meio do teste- F estatístico é possível analisar, também, a significância de um determinado grupo de variáveis regressoras. Com isso é possível avaliar, separadamente, se o conjunto de termos lineares, quadráticos ou interações de modelos MLR de segunda ordem são significativos na modelagem. Neste caso, modelos reduzidos, sem a presença dos termos investigadas, são ajustados, sendo, então, F_0 parciais calculados e analisados.

3.4.2.2 Teste para a significância de regressores individuais

Geralmente, é conveniente analisar a significância das variáveis do modelo individualmente, como apresentado nas hipóteses da Equação (3.39):

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (3.39)$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \quad j = 1, 2, \dots, k$$

Neste caso, o procedimento é similar ao realizado nos testes F —estatísticos, porém, utilizando-se a tabela da distribuição estatística t de Student. Assim, o parâmetro t_0 estatístico de cada coeficiente do modelo MLR é calculado de acordo com a Equação (3.40), conforme exposto em [Montgomery e Myers \(1995\)](#), sendo comparado com um valor associado na tabela da distribuição t .

$$t_0 = \frac{b_j}{\sqrt{\sigma^2 C_{jj}}}. \quad (3.40)$$

Na expressão (3.40), b_j é o coeficiente a ser analisado, C_{jj} o elemento da diagonal principal da matriz $(X'X)^{-1}$ associado a b_j e σ^2 uma estimativa imparcial da variância do modelo, calculada pela Equação (3.41):

$$\sigma^2 = \frac{SQ_e}{n - k - 1}. \quad (3.41)$$

Comparando-se o valor calculado t_0 com o valor associado na tabela da distribuição t , para um nível de significância $\alpha/2$ e $n-k-1$ graus de liberdade, é possível verificar se determinada variável regressora é significativa para o modelo, considerando que todas as outras variáveis estudadas estejam inclusas no mesmo. Se $|t_0| > t_{\alpha/2, n-k-1}$, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, estabelece-se estatisticamente que a variável analisada contribui de maneira significativa para o modelo, se as outras variáveis utilizadas na regressão estiverem representadas no mesmo.

3.4.2.3 O p —valor

Outra forma de verificar a significância da regressão dos modelos MLR e de seus coeficientes é calcular os p —valores associados aos testes estatísticos F e t do modelo, respectiva-

mente. Segundo [Wackerly et al. \(2008\)](#) e [Montgomery e Runger \(2011\)](#), a análise dos testes estatísticos pelos p -valores é mais satisfatória, comparativamente às análises dos parâmetros F_0 e t_0 , uma vez que possibilita interpretações dos valores obtidos nestes testes para diferentes níveis de significância, e não somente para o nível α preestabelecido.

Conforme a definição de [Wackerly et al. \(2008\)](#), se W é o valor obtido em um determinado teste estatístico, o p -valor representa o menor nível de significância para o qual os dados observados indicam que a hipótese nula pode ser rejeitada. Por conseguinte, o p -valor fornece uma medida de credibilidade nas refutações das hipótese nulas assumidas.

Para um determinado teste W estatístico, o p -valor é calculado pela probabilidade, sob hipótese nula, de que o teste estatístico irá assumir um valor que é pelo menos tão extremo quanto ao valor observado da estatística (certo parâmetro W_0 calculado no teste), como descrito na Equação (3.42):

$$P_{valor} = P(W \leq W_0, \text{ quando } H_0 \text{ é verdadeira}). \quad (3.42)$$

Na análise de um modelo MLR pelo p -valor, a hipótese nula é rejeitada se os p -valores associados às estatísticas F_0 e/ou t_0 forem menores que um determinado nível de significância de interesse.

3.4.2.4 Coeficientes de determinação múltipla

Dois outros parâmetros que merecem destaque na análise estatística de um modelo MLR são os coeficientes de determinação múltipla R^2 e R_{adj}^2 , calculados pelas Equações (3.43) e (3.44), nesta ordem, onde SQ_t é a soma total dos quadrados, dada pela soma de SQ_r e SQ_e das Equações (3.37) e (3.38), respectivamente.

$$R^2 = \frac{SQ_r}{SQ_t}, \quad (3.43)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) (1 - R^2). \quad (3.44)$$

Segundo [Montgomery e Myers \(1995\)](#), os coeficientes de determinação múltipla fornecem uma medida do quanto o modelo de regressão é capaz de explicar sobre a variabilidade dos dados utilizados em sua obtenção, ou seja, fornecem uma medida da qualidade do modelo ajustado. Quanto mais próximo de 1 os valores obtidos para R^2 e R_{adj}^2 , melhor o ajuste do modelo *MLR* aos dados utilizados.

Uma vez que o valor de R^2 sempre aumenta à medida que termos são adicionados ao modelo, independente de serem significativos ou não, o uso do coeficiente de determinação ajustado estatisticamente (R_{adj}^2) é preferível na análise estatística, sendo que uma diferença acentuada entre os valores de R^2 e R_{adj}^2 pode representar um indício da presença de termos não significativos no modelo *MLR* estudado.

3.4.2.5 Erro médio quadrático

Outra forma de mensurar a qualidade de um modelo *MLR* é avaliar a raiz quadrada do erro médio quadrático (*RMSE* - *Root Mean Squared Error*) da regressão, calculado de acordo com a Equação (3.45):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n - k - 1} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n - k - 1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (3.45)$$

De acordo com [Montgomery et al. \(2006\)](#), a quantidade *RMSE* é geralmente denominada Erro Padrão da Regressão, podendo ser calculada pela Equação (3.46). Desta forma, como σ^2 representa uma estimativa imparcial da variância do modelo, como discutido em [Montgomery e Myers \(1995\)](#) e definido na Equação (3.41), o *RMSE*, calculado pela Equação (3.46), pode ser interpretado como uma estimação imparcial do desvio padrão do modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{SQ_e}{n - k - 1}}. \quad (3.46)$$

Quanto mais próximo de 0 o valor obtido para *RMSE*, melhor o ajuste do modelo *MLR* aos dados utilizados.

3.4.3 Análise Residual

Na regressão linear múltipla, algumas suposições são realizadas no ajuste e verificação dos modelos. Conforme discutido em [Wisniak e Polishuk \(1999\)](#) e [Montgomery e Runger \(2011\)](#), as seguintes premissas são adotadas: i) é suposto que a variável de resposta é uma função linear das variáveis regressoras; ii) para a estimação dos parâmetros dos modelos, é assumido que os erros são variáveis aleatórias não correlacionadas (independentes), com média zero e mesma variância; e, iii) para a realização dos testes de hipóteses, para uma avaliação da significância dos modelos ajustados, é assumido que os erros são normalmente distribuídos.

Segundo [Montgomery e Myers \(1995\)](#), se o modelo ajustado for apropriado, os resíduos de modelagem, isto é, $\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i$ para $i = 1, 2, \dots, n$, devem refletir as suposições impostas para o termo de erro do modelo, sendo y_i uma determinada observação da saída e $\hat{y}_i$ uma estimação da mesma pelo modelo *MLR*. Desta forma, gráficos dos resíduos de modelagem podem ser utilizados na investigação das suposições adotadas e confirmação da adequação do modelo de regressão, procedimento denominado Análise Residual Gráfica.

Para verificar a suposição de normalidade, utiliza-se o gráfico de probabilidade normal dos resíduos, onde os mesmos são representados, em ordem crescente, em função dos seus valores esperados, calculados considerando-se uma distribuição normal. A suposição de normalidade é satisfeita se os resíduos estiverem dispostos aproximadamente como uma linha reta no gráfico ([Montgomery e Myers, 1995](#)). De acordo com [Montgomery et al. \(2006\)](#), pequenos desvios da normalidade não afetam o modelo *MLR* de maneira expressiva e podem ser negligenciados. Contudo, desvios severos devem ser considerados e investigados, uma vez que os testes estatísticos F e t dependem diretamente da suposição de normalidade.

O gráfico dos resíduos pela resposta estimada é usualmente utilizado na verificação da suposição de variância constante, ou homocedasticidade. Tal suposição é validada se os pontos do gráfico estiverem distribuídos de forma aparentemente aleatória abaixo e acima da linha de $\epsilon = 0$, com limiares $\epsilon = \pm 2\epsilon_{max}$, sendo ϵ_{max} o valor absoluto do maior resíduo ([Rawlings](#)

et al., 1998). Segundo *Montgomery et al.* (2006), o surgimento de padrões quadráticos no gráfico dos resíduos pela resposta estimada pode ser um indício da existência de não-linearidades entre as variáveis de entrada e saída utilizadas na regressão.

A premissa de independência dos erros pode ser avaliada pelo gráfico dos resíduos em função da ordem de coleta dos dados. De acordo com *Rawlings et al.* (1998), o surgimento de tendências/padrões neste gráfico pode ser um forte indicativo de resíduos correlacionados.

Além da certificação das premissas de modelagem, a análise residual gráfica de modelos *MLR* pode ser utilizada na identificação de *outliers*, que são observações atípicas dos conjuntos de dados medidos, isto é, observações com comportamento muito diferente da grande maioria dos dados. Segundo *Wisniak e Polishuk* (1999), nos gráficos dos resíduos, pontos muito distantes da região onde a grande maioria dos pontos estão localizados podem ser considerados *outliers* e devem ser investigados. Caso se constate que estas observações sejam errôneas como, por exemplo, decorrentes de medições mal conduzidas, as mesmas podem ser desprezadas e o modelo *MLR* reajustado.

3.4.4 O método de ajuste *Stepwise*

Este método de ajuste de modelos *MLR* constitui um procedimento padrão para a procura de um subconjunto apropriado de variáveis regressoras ou termos do modelo, sendo inicialmente proposto por *Efroymson* (1960). Segundo *Montgomery e Runger* (2011), a regressão *Stepwise*, ou regressão em etapas, é a técnica mais utilizada para a seleção de variáveis regressoras de modelos *MLR*, atuando de forma a construí-los iterativamente, adicionando ou removendo variáveis/termos em cada etapa, de acordo com critérios pré-determinados.

A técnica *Stepwise* de ajuste é fundamentada nos métodos de seleção de variáveis *forward* e *backward*, visando contornar as limitações destas duas estratégias. De acordo com *Walpole et al.* (2012), na seleção *forward*, ou “para frente”, modelos *MLR* são ajustados adicionando-se as variáveis regressoras uma a uma, até que determinada condição de parada seja alcançada. Procedimento inverso é realizado na seleção *backward*, ou “retrógrada”, sendo as variáveis

regressoras removidas uma a uma de um modelo preliminar completo, composto por todas as variáveis candidatas. Em ambos os métodos, os critérios para a inserção ou retirada de determinada variável/fator são baseados na comparação dos F estatísticos parciais de cada variável, ou t estatísticos, ou mesmo os p -valores associados, com limiares pré-estabelecidos. Como a adição ou remoção de uma variável no modelo de regressão contribui para a significância de outras variáveis, uma vez que os seus parâmetros estatísticos se alteram, os métodos de seleção *forward* e *backward* se mostram ineficazes, podendo fornecer um modelo *MLR* final repleto de variáveis redundantes. Neste sentido, uma variável anteriormente adicionada no método de seleção *forward* pode se tornar não-significativa à medida que outras variáveis são adicionadas ao modelo, ou uma variável previamente removida no método *backward* pode se tornar significativa à medida que outras variáveis são removidas (Rawlings *et al.*, 1998).

Na técnica *Stepwise*, regressores anteriormente inseridos no modelo são reavaliados em cada etapa, tendo em vista a eliminação de possíveis variáveis redundantes. Assim, o método de regressão *Stepwise* é um método *forward* que volta a verificar, em cada passo, a importância das variáveis inseridas, isto é, à medida que cada variável é adicionada ao modelo *MLR*, um procedimento *backward* é executado, removendo as variáveis que se tornam insignificantes. Deste modo, se o índice estatístico (F -parcial ou t , ou p -valores associados) de qualquer variável não satisfizer os critérios mínimos para permanência no modelo, que são preestabelecidos, o procedimento *backward* passa a remover variáveis, em etapas, até que todas as variáveis restantes satisfaçam os critérios. Em seguida, a adição de novas variáveis candidatas é novamente avaliada pelo método *forward*. O regime *stepwise* continua até que todas as variáveis do modelo satisfaçam os critérios para permanecerem no mesmo e todas as variáveis ausentes não satisfaçam os critérios para serem inseridas (Rawlings *et al.*, 1998).

O fluxograma da Figura 3.5 ilustra o método de ajuste de modelos *MLR* pela estratégia *Stepwise*, empregada a partir de um modelo inicial, onde $p_{entrada}$ e p_{saida} representam limiares para a inserção e retirada de termos candidatos no modelo, respectivamente.

Conforme discutido em Rawlings *et al.* (1998), deve ser ressaltado que o método de re-

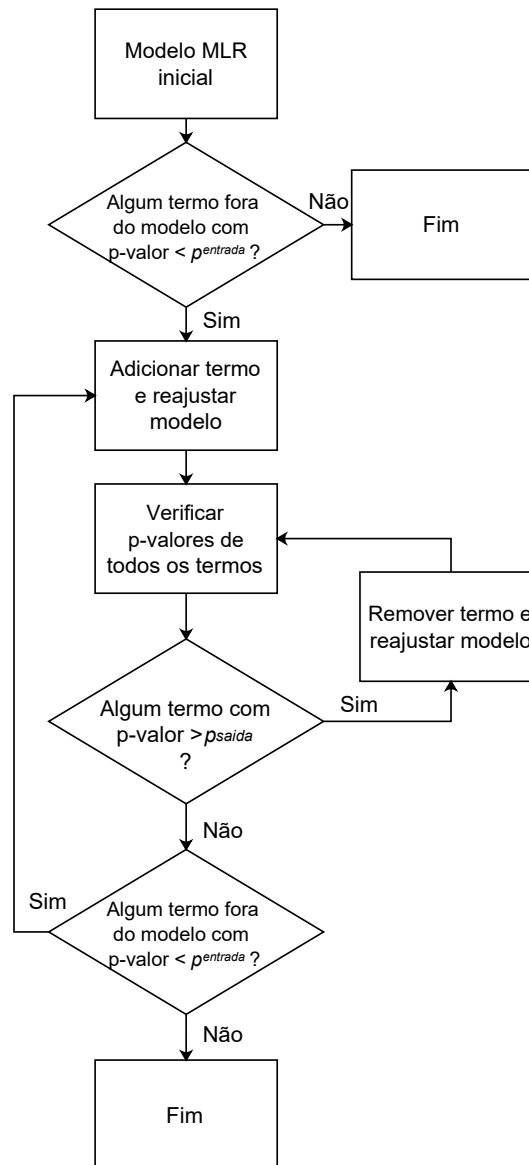


Figura 3.5: Fluxograma do processo de ajuste de modelos *MLR* pelo método *Stepwise*.

gressão *stepwise* não representa um método de otimização de modelos *MLR*, uma vez que o subconjunto de variáveis regressoras identificado para a modelagem não é, necessariamente, o melhor, ou o “ótimo”. Este subconjunto contém apenas variáveis regressoras que, se empregadas na modelagem, podem representar o sistema adequadamente. Ademais, não é garantido que o modelo *MLR* final ajustado pelo método *Stepwise* satisfaça, automaticamente, as premissas de modelagem. Desta forma, após o ajuste em etapas, uma análise residual deve ser ainda realizada.

3.5 Considerações do Capítulo

Os fundamentos envolvidos na modelagem *MTL* de enrolamentos de transformadores frente às *PDs*, extração de características de sinais e desenvolvimento de modelos *MLR* foram apresentados neste Capítulo. Neste sentido, foi abordado o equacionamento relacionado à incorporação do pulso da descarga parcial na modelagem do enrolamento como linhas de transmissão acopladas, extração de características estatísticas e *PCA* dos sinais terminais das *PDs*, desenvolvimento e emprego do método dos mínimos quadrados no ajuste dos modelos *MLR*, análises de variância e dos resíduos, para uma verificação da qualidade e adequação dos modelos de regressão, respectivamente, e um método iterativo de ajuste (*Stepwise*).

A técnica *MLR*, realizada em etapas e por meio de parâmetros estatísticos e de *PCA*, extraídos de sinais computacionalmente simulados das *PDs*, foi utilizada neste trabalho por se tratar de uma forma mais elementar e rápida na elaboração de classificadores dos locais de ocorrência destas descargas ao longo dos enrolamentos, em comparação com a maioria dos métodos identificados na literatura.

No Capítulo seguinte será abordada a bancada de testes, projetada e utilizada neste trabalho, assim como exemplares de capacitores, devidamente construídos e constituintes da forma proposta para a geração experimental de pulsos de corrente de descargas parciais.

CAPÍTULO 4

ASPECTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Introdução

O presente Capítulo apresenta aspectos relacionados ao projeto e construção do protótipo de um enrolamento e de exemplares de capacitores empregados nos testes experimentais deste trabalho, para a geração de sinais representativos das *PDs*. Com sinais experimentais das descargas, os modelos *MLR* localizadores, desenvolvidos apenas com dados de simulação computacional, podem ser avaliados também para dados mais próximos da realidade, confirmando sua aplicabilidade na localização das *PDs* ao longo dos enrolamentos dos transformadores de potência.

4.2 A bancada experimental

4.2.1 Projeto do enrolamento

O protótipo utilizado neste trabalho foi projetado de acordo com os procedimentos expostos em [Jewell \(1990\)](#) e [Wellauer \(1973\)](#), para a concepção de enrolamentos de transformadores e da isolamento sólida entre condutores dos mesmos, respectivamente.

De acordo com [Jewell \(1990\)](#), as seguintes etapas devem ser executadas no projeto de um transformador monofásico: i) especificação das características do equipamento, isto é, da potência nominal, tensão de alimentação do enrolamento primário, relação de transformação, regulação de tensão e eficiência desejadas; ii) projeto inicial, onde o número mínimo de espiras, o diâmetro mínimo dos condutores e a quantidade de fio necessária para a construção dos enrolamentos são determinados; iii) teste, em que as características especificadas são verificadas; e iv) reprojeção, onde os valores anteriormente obtidos são ajustados, caso necessário.

O número mínimo de espiras do enrolamento primário pode ser calculado de acordo com a Equação (4.1), expressa em [Jewell \(1990\)](#), sendo V_{rms} o valor eficaz estipulado para a tensão de alimentação do mesmo, f a frequência da tensão de alimentação, A a área da seção reta do núcleo magnético onde o enrolamento será construído e B_{max} a máxima densidade de fluxo magnético no núcleo, valor correspondente ao ponto imediatamente abaixo do “joelho” da curva de magnetização do material magnético, de modo a garantir uma operação do transformador sem saturação e com alta eficiência. A quantidade de espiras do enrolamento secundário pode ser determinada de acordo com a relação de transformação desejada.

$$N1_{min} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{rms}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_{max} \cdot A}. \quad (4.1)$$

O diâmetro mínimo do fio adotado para a construção dos enrolamentos é determinado de acordo com a máxima corrente circulante nos mesmos, valor correspondente às correntes de curto-circuito. A quantidade mínima de condutor necessária para a construção pode ser determinada de acordo com o número mínimo de espiras calculado e a seção reta do núcleo.

Segundo [Wellauer \(1973\)](#) o isolamento sólido existente entre discos ou camadas dos enrolamentos dos transformadores de potência deve ser capaz de suportar tanto a diferença de potencial existente nestas regiões em condições de operação normal quanto a diferença de potencial existente em caso de elevados gradientes de tensão, como aqueles decorridos de descargas atmosféricas e manobras de chaveamento. Desta forma, a isolação sólida é projetada para a máxima solicitação de tensão, isto é, para os elevados gradientes de tensão,

tomando-se como base um impulso de tensão com rápido tempo de subida.

Conforme exposto em Wellauer (1973) a máxima solicitação de tensão entre camadas de um enrolamento pode ser calculada de acordo com a Equação (4.2):

$$u_{max} = \sqrt{\frac{mC}{K/m} \cdot \frac{1}{m}} \cdot u, \quad (4.2)$$

sendo u a amplitude do impulso necessário no ensaio de tensão impulsiva, mC a capacitância total do enrolamento para a terra, K/m a capacitância série da primeira à última bobina e m o número total de espiras do enrolamento. Os valores de mC e K/m podem ser diretamente estimados de acordo com uma Figura da referência (Figura 8.10g de Wellauer (1973)), em função da tensão de alimentação do enrolamento e da potência do transformador.

A partir do valor obtido para u_{max} , a espessura necessária para o isolamento sólido é determinada como um valor suficiente para suportar a máxima solicitação de tensão, de acordo com a rigidez dielétrica do material isolante a ser utilizado. A quantidade mínima de material isolante necessária pode ser determinada a partir da seção reta do núcleo, incluindo-se as espessuras das camadas de espiras a serem isoladas.

Em resumo, o seguinte procedimento deve ser realizado no projeto de um transformador monofásico, de acordo com os trabalhos de Jewell (1990) e Wellauer (1973):

- i) Especificar as características desejadas para o transformador;
- ii) calcular o número mínimo de espiras do enrolamento primário, por meio da Equação (4.1), e do enrolamento secundário, de acordo com a relação de transformação desejada;
- iii) determinar o diâmetro mínimo dos condutores, de acordo com as correntes de curto-circuito circulantes nos enrolamentos, e verificar se os enrolamentos projetados se acomodarão no núcleo magnético;
- iv) determinar a menor quantidade de fio necessária para a construção dos enrolamentos;
- v) calcular a máxima solicitação de tensão, por meio da Equação (4.2);

- vi) determinar a espessura mínima do isolamento sólido capaz de suportar a máxima solicitação de tensão, de acordo com a rigidez dielétrica do material isolante a ser utilizado;
- vii) determinar a menor quantidade de material isolante necessária para a construção do isolamento entre as camadas dos enrolamentos;

4.2.2 Memorial de cálculo

A Figura 4.1 ilustra as dimensões do núcleo magnético disponibilizado para a construção do protótipo utilizado neste trabalho, que é formado por placas de ferro fundido sustentadas por duas barras de ferro.

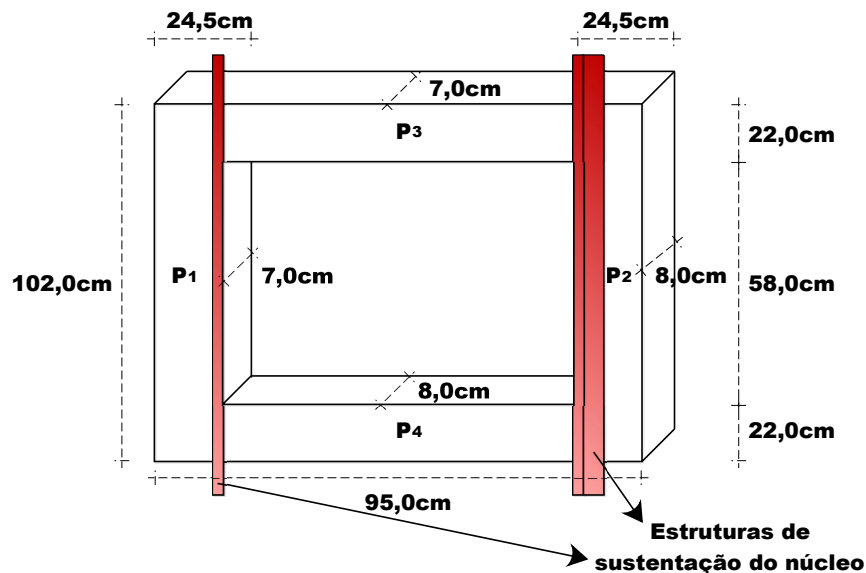


Figura 4.1: Dimensões do núcleo utilizado na construção do protótipo.

As seguintes características foram tomadas para o projeto inicial do protótipo: potência aparente nominal de 10 MVA ; tensão de alimentação de primário $V_{1(rms)} = 8\text{ kV}$, em 60 Hz ; enrolamento primário composto por 4 camadas contínuas de condutores (*layer-type*), por simplicidade, uma vez que o protótipo será construído manualmente; e alta eficiência, garantida pela operação nas proximidades do “joelho” da curva de magnetização do núcleo de ferro fundido, ponto em que a máxima densidade de fluxo magnético é $B_{max} \simeq 0,58\text{ T}$. A princípio, com o intuito de se verificar a factibilidade de realização dos testes experimentais

e da metodologia proposta neste trabalho de doutoramento, apenas o enrolamento primário foi projetado e construído. Assim sendo, a relação de transformação desejada, assim como o enrolamento secundário do transformador monofásico, não foram considerados.

Neste projeto, optou-se por construir o enrolamento primário na “perna” $P1$ do núcleo. Uma vez que as barras de sustentação laterais não podem ser removidas, visto que as placas de ferro fundido constituintes do núcleo podem se desmantelar neste processo, optou-se por construir o enrolamento por cima das mesmas. Assim, $0,10\text{ cm}$, correspondentes à altura da barra de sustentação lateral devem ser adicionados na espessura da “perna” $P1$ do núcleo, resultando em uma área de seção reta $A \simeq 0,0296\text{ m}^2$.

Das características estipuladas, o número mínimo de espiras do enrolamento primário, calculado de acordo com a Equação (4.1), foi de ~ 438 espiras por camada.

Uma vez que não circulará uma corrente elevada no enrolamento, optou-se por utilizar condutor de cobre circular de 20AWG (aproximadamente $0,812\text{ mm}$ de diâmetro), que é capaz de suportar uma corrente máxima de até 9 A e possibilita a acomodação do enrolamento no núcleo disponível. Considerando o perímetro da perna $P1$ do núcleo magnético, $\sim 1288\text{ m}$ de fio de cobre de 20AWG são necessários para a constituição do enrolamento.

Para a elaboração do isolamento sólido existente entre as 4 camadas do enrolamento, a máxima solicitação de tensão deve ser determinada de acordo com a Equação (4.2). Desta forma, considerando-se $mC \simeq 2670\text{ pF}$, $K/m \simeq 6\text{ pF}$ e $u = 75\text{ kV}$, valores estimados a partir da Figura 8.10g e da Tabela 11.2g de Wellauer (1973), um valor de $u_{max} \simeq 3,24\text{ kV}$ foi calculado. A partir do valor determinado para u_{max} e utilizando-se a Figura 8.10h de Wellauer (1973), pode-se determinar a espessura mínima de papel isolante necessária para suportar a máxima solicitação de tensão. Neste ponto, escolheu-se adotar um isolamento sólido de papel kraft¹ com espessura de $0,5\text{ mm}$, sem impregnação com óleo, por simplicidade. Considerando o perímetro da perna $P1$ do núcleo e as espessuras aproximadas das camadas do enrolamento projetado, $\sim 2,70\text{ m}$ de papel isolante são necessários para as regiões de isolamento sólido, tanto entre camadas quanto entre a camada interna e o núcleo magnético.

¹Tipo de papel mais comumente empregado no isolamento entre camadas de enrolamentos (Harlow, 2004).

4.2.3 Construção do protótipo

O enrolamento de 4 camadas foi estruturado na perna $P1$ do núcleo, a partir do topo do mesmo, de forma contínua e concêntrica, utilizando condutor de cobre circular de 20AWG. Cada camada de 438 espiras, assim como a camada mais interna e o núcleo, foram isoladas por meio de papel *filmepele*² de espessura 0,5 mm. Para o isolamento entre espiras de uma mesma camada, apenas o verniz isolante dos condutores de cobre foi utilizado, o qual é capaz de suportar as pequenas diferenças de potencial existentes nestes pontos.

Ao longo do processo de manufatura, 3 derivações foram extraídas em cada uma das 4 camadas, de forma a contemplarem $\sim 20\%$, $\sim 50\%$ e $\sim 80\%$ das 438 espiras existentes, sendo o verniz isolante reconstituído. Desta forma, o enrolamento construído apresenta 12 derivações, como ilustrado na Figura 4.2, contendo aproximadamente 95%, 88%, 80%, 70%, 62%, 55%, 45%, 38%, 30%, 20%, 12% e 5% do total de espiras, contando-se a partir da primeira espira, situada na base da camada mais interna, terminal alocado para o aterramento do enrolamento. O terminal da última espira da camada mais externa, situada no topo do enrolamento, foi destinado para a alimentação do mesmo.

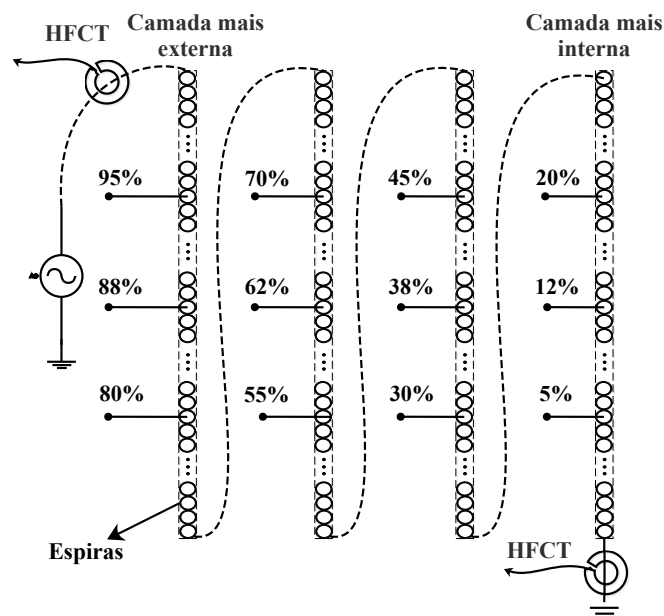


Figura 4.2: Representação do enrolamento de 4 camadas construído.

²Papel *kraft* com filme de poliéster.

A Figura 4.3(a) mostra uma derivação extraída em determinada espira do enrolamento e a Figura 4.3(b) uma perspectiva geral do enrolamento construído. Visando uma maior segurança na realização dos testes experimentais, as derivações extraídas foram afixadas em um terminal de bornes, constituído com contatos metálicos e distante aproximadamente 0,20 *cm* do enrolamento, como mostrado na Figura 4.4.

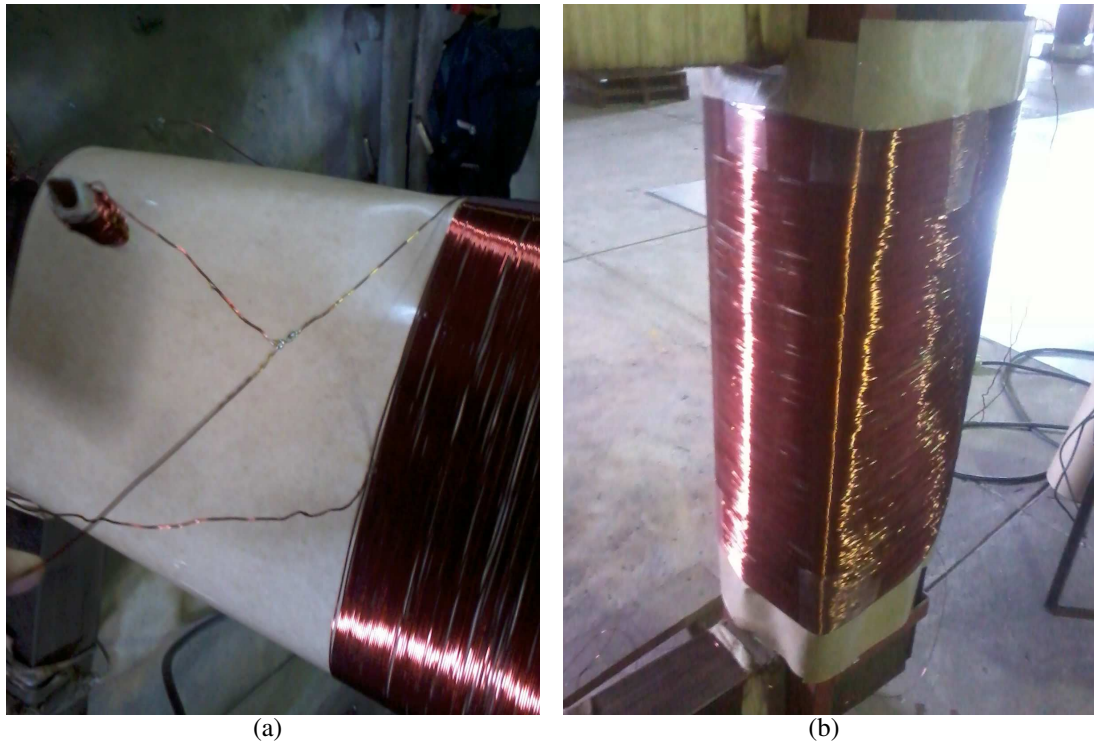


Figura 4.3: Protótipo de enrolamento de 4 camadas construído: (a) extração de uma derivação; (b) perspectiva.

Por inviabilidade, o enrolamento construído não foi submerso em óleo isolante. Não obstante, o isolamento líquido afetaria apenas a permissividade dos acoplamentos capacitivos existentes, não alterando estes caminhos de menor impedância encontrados pelos pulsos de alta frequência das descargas parciais.

4.2.4 Equipamentos constituintes

Além do protótipo de enrolamento, projetado e construído de acordo com os procedimentos discutidos nesta Seção, a bancada experimental é composta pelos seguintes equipamentos:

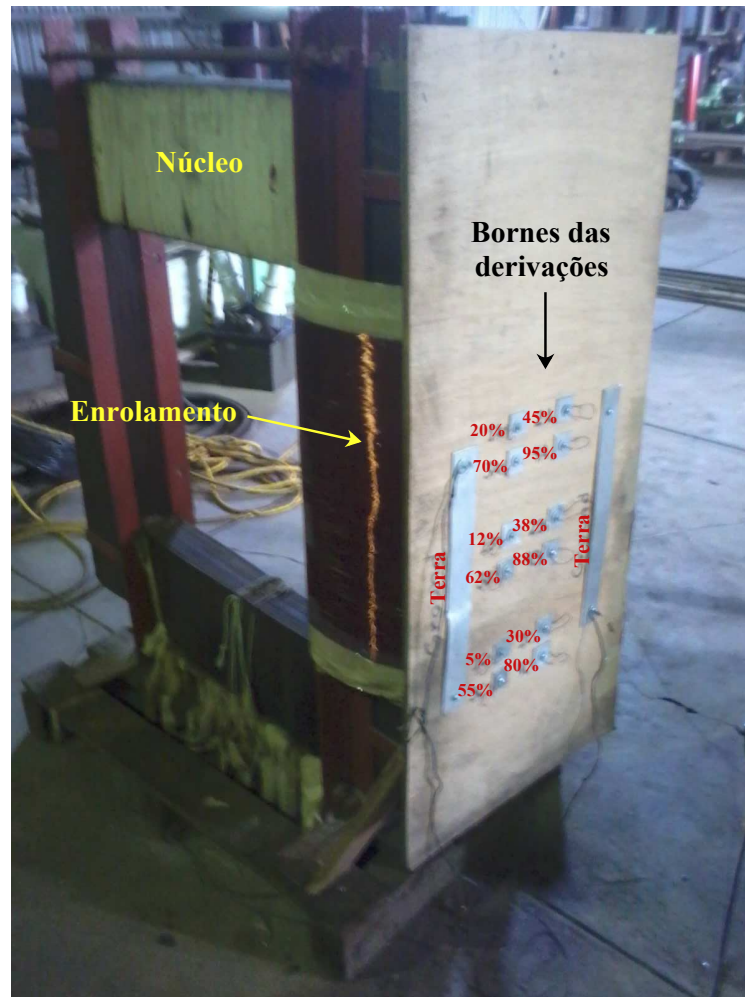


Figura 4.4: Terminais das derivações do enrolamento construído.

1 transformador monofásico de 10 kVA e $220 - 120\text{V}/6,6\text{ kV}$, para elevação da tensão e alimentação do protótipo; 1 *varivolt* trifásico de 9 kVA e $220/240\text{ V}$, para controle da tensão de alimentação; 1 sensor de alta tensão, para monitoramento da tensão de alimentação do enrolamento construído; 2 *HFCTs*, para captura dos pulsos de corrente das *PDs*, instalados nas extremidades de alimentação e de aterramento do enrolamento sob teste; e 1 osciloscópio digital de 4 canais, para observação e armazenamento dos sinais medidos.

A Figura 4.5 mostra uma visão geral da bancada de testes empregada neste trabalho, onde pode-se observar todos os equipamentos constuintes, e a Figura 4.6 apresenta um esquemático das conexões. As principais características dos equipamentos utilizados são expostas no apêndice A.

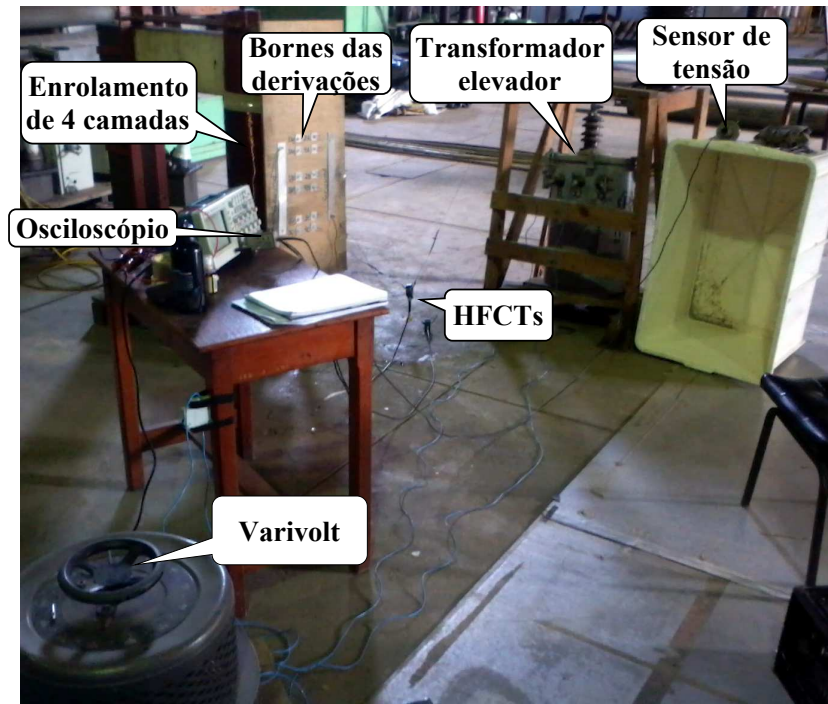


Figura 4.5: Visão geral da bancada de testes.

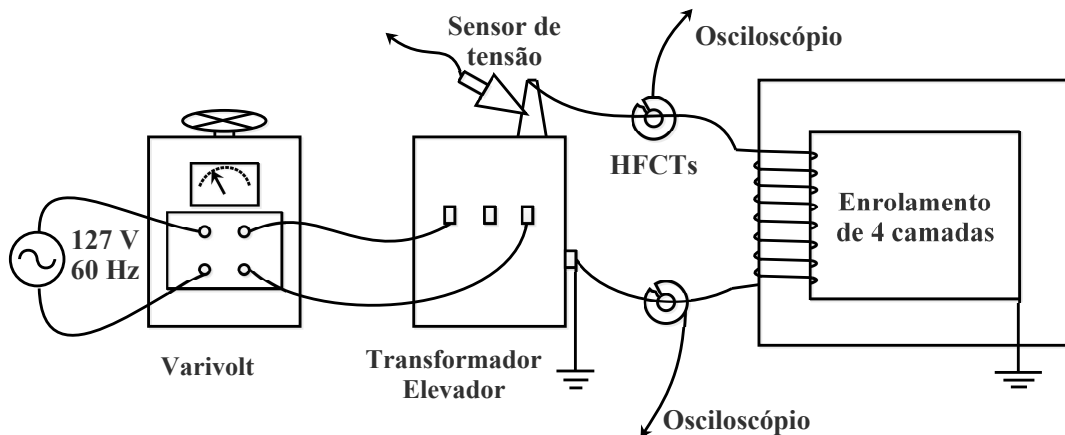


Figura 4.6: Esquemático das conexões da bancada de testes.

4.3 Capacitores para os testes experimentais

Para a geração experimental de pulsos de corrente similares às *PDs* advindas da degradação do isolamento sólido (papel) de transformadores de potência, neste trabalho, é proposto a realização de distúrbios capacitivos em derivações dos enrolamentos, conforme procedimento melhor detalhado na Seção 5.2. Neste sentido, visto que os valores de capacitância de capacitores comercialmente disponíveis se mostram inadequados para a geração de *PDs*

relativas às condições incipientes da falha, uma vez que um grande número destes dispositivos necessitariam ser associados para obtenção das magnitudes das descargas em condições iniciais, principalmente em testes em tensões elevadas, optou-se pelo projeto e construção dos capacitores necessários.

4.3.1 Projeto dos capacitores

A partir dos valores de tensão disponíveis nas derivações do protótipo (V_{tap}), em virtude da alimentação do mesmo com um valor preestabelecido, e da magnitude desejada para as descargas das PDs (Q), os valores de capacitores que possibilitam descargas desta intensidade podem ser calculados de acordo com a Equação (4.3), a qual relaciona a máxima capacidade de carga/descarga de um capacitor em função da tensão aplicada sobre o mesmo.

$$C = Q/V_{tap}. \quad (4.3)$$

Por conveniência, neste trabalho, decidiu-se por utilizar a configuração de capacitores de placas paralelas quadradas, separadas por um determinado meio dielétrico, conforme ilustrado na Figura 4.7:

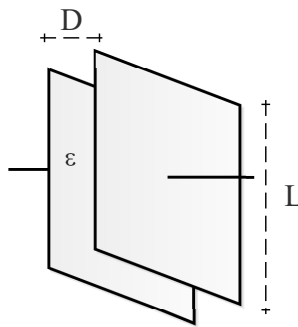


Figura 4.7: Configuração de capacitor de placas paralelas.

Considerando-se a não-uniformidade do campo elétrico nas proximidades das bordas do capacitor, que altera a capacitância da estrutura, as dimensões necessárias para os valores de capacitância estimados podem ser determinados pela aproximação de [Palmer \(1937\)](#), de acordo com a Equação (4.4), sendo ε a permissividade do meio dielétrico, L o compri-

mento das placas e D o distanciamento entre as mesmas (Leus e Elata, 2004). Desta forma, conhecendo-se os valores de C , ε e D , o comprimento L das placas necessárias pode ser calculado.

$$C = \varepsilon \frac{L}{D} \left[1 + \frac{D}{\pi L} + \frac{D}{\pi L} \ln \left(\frac{2\pi L}{D} \right) \right]. \quad (4.4)$$

4.3.2 Construção dos capacitores

Uma vez que placas de circuito impresso dupla-face contém duas superfícies condutoras separadas por um material dielétrico, tais artefatos se apresentam inerentemente como capacitores de placas paralelas. Por conseguinte, tais dispositivos foram utilizados neste trabalho na constituição dos capacitores empregados nos testes experimentais.

Para placas de circuito impresso de fibra de vidro (*PCB FR-4*), dielétrico com permissividade relativa de $\varepsilon_r \sim 4,5$ (1 MHz), com separação das faces de cobre de $D \sim 1,51\text{ mm}$, os comprimentos dos capacitores de placas paralelas quadradas podem ser estimados de acordo com a Equação (4.4), a partir dos valores de capacitância calculados na Equação (4.3). Considerando-se que o protótipo do enrolamento seja alimentado por uma tensão senoidal de $\sim 3,15\text{ kV}$ (pico), valor que não causa a saturação do núcleo magnético, para a geração de descargas de até 5000 pC , magnitude inferior ao valor que macroscopicamente degrada o papel isolante (10000 pC , segundo Okabe *et al.* (2010)), os valores e dimensões dos capacitores necessários para a realização de distúrbios capacitivos em cada derivação do enrolamento são mostrados na Tabela 4.1.

No processo de manufatura dos capacitores, para a medição e corte dos comprimentos necessários, foi utilizada uma régua com resolução $0,1\text{ mm}$ e uma serra de corte com espessura aproximada de também $0,1\text{ mm}$, respectivamente. Desta forma, os valores dos comprimentos das placas necessárias nos testes experimentais foram arredondados para os valores decimais mais próximos, os quais são de obtenção factível com os instrumentos disponíveis. Para facilitar a realização dos distúrbios capacitivos no enrolamento, terminais foram soldados em

Tabela 4.1: Capacitores de fibra de vidro para testes experimentais com descargas de até 5000 pC , sendo o protótipo alimentado por tensão senoidal de $3,15\text{ kV}$ de pico.

Derivação	$V_{tap}\text{ (kV)}$	$C\text{ (pF)}$	$L\text{ (cm)}$
95%	2,99	1,67	0,59
88%	2,77	1,81	0,62
80%	2,52	1,98	0,66
70%	2,20	2,27	0,72
62%	1,95	2,54	0,77
55%	1,73	2,89	0,83
45%	1,42	3,52	0,93
38%	1,20	4,23	1,04
30%	0,94	5,29	1,18
20%	0,63	7,94	1,49
12%	0,38	12,76	1,94
5%	0,16	32,33	3,22

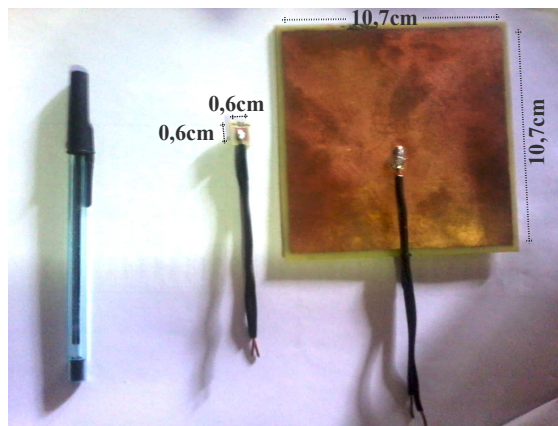
cada uma das faces de cobre das peças cortadas.

A Figura 4.8(a) mostra o menor e o maior capacitor construídos para a realização dos testes experimentais e a Figura 4.8(b) uma comparação entre os valores de capacitância esperados e obtidos, medidos por meio de uma ponte RLC em 100 kHz . Apesar das aproximações realizadas, tanto no projeto quanto na manufatura dos capacitores, os valores de capacitância medidos se mostraram bastante próximos dos valores esperados para os mesmos, sendo que quanto maior o comprimento da placa maior o desvio da capacitância. Neste sentido, o percentual do erro médio absoluto³ foi de apenas $0,1068\%$.

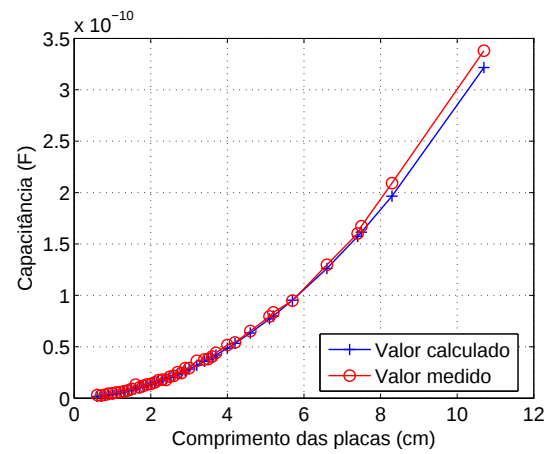
4.4 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo foram apresentados os principais pontos envolvidos no projeto e na construção do protótipo do enrolamento e dos exemplares de capacitores utilizados neste trabalho. Tais artefatos, por meio da metodologia de distúrbios capacitivos proposta, possibilitam a geração experimental de pulsos relativos às PDs , fato essencial na avaliação de técnicas de localização desenvolvidas utilizando-se apenas sinais de simulações computacionais. Com

³ $MAPE$ - Mean Absolute Percentage Error: fornece uma indicação do tamanho médio do erro.



(a)



(b)

Figura 4.8: (a) Menor e maior capacitores construídos; (b) comparação entre os valores de capacitância esperados e medidos.

isso, a aplicabilidade do método de localização para casos mais próximos da realidade pode ser confirmada, vislumbrando seu emprego no monitoramento das *PDs* em transformadores de potência reais.

CAPÍTULO 5

GERAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS *PDS*

5.1 Introdução

A metodologia proposta para a identificação e localização de falhas no isolamento sólido dos transformadores de potência é discutida neste Capítulo, onde são abordados: i) os testes experimentais realizados no protótipo de um enrolamento; ii) o pré-processamento dos sinais terminais coletados; iii) a modelagem do protótipo e a geração de sinais computacionalmente simulados pela *MTL*; iv) a extração de características estatísticas e *PCA* dos sinais obtidos; v) e o procedimento empregado no ajuste de modelos *MLR* em etapas.

Neste trabalho, os modelos *MLR* de localização das *PDs* são desenvolvidos a partir de características advindas exclusivamente de sinais de simulações computacionais, tendo seu desempenho avaliado para os sinais das *PDs* geradas experimentalmente. Como discutido anteriormente, o desenvolvimento de estratégias de localização das *PDs* por dados de simulação, com possibilidade de emprego para dados reais, é de considerável importância, visto que, em situações práticas, os transformadores de potência não possuem derivações em seus enrolamentos para a injeção de pulsos e obtenção de sinais de referência para o desenvolvimento dos métodos de localização.

5.2 Testes experimentais

Os testes experimentais realizados no protótipo do enrolamento buscaram reproduzir os rápidos pulsos de corrente (PDs) resultantes do processo de deterioração do isolamento sólido dos enrolamentos de transformadores, em situação ainda incipiente da falha. Em geral, tais pulsos são injetados no enrolamento e tendem a se propagarem até as extremidades do mesmo, onde podem ser captados por meio de $HFCTs$.

Para a geração de pulsos de corrente similares às PDs , é proposto a utilização de capacitores descarregados, devidamente empregados na realização de pequenos distúrbios entre derivações do enrolamento alimentado e da terra. No momento de cada conexão, a energia armazenada nas capacitâncias intrínsecas do enrolamento é descarregada, no ponto de ocorrência da perturbação, criando rápidos pulsos de corrente que se propagam em direção às extremidades do enrolamento.

A geração do pulso de corrente de uma PD pela descarga de um capacitor é sustentada por [Kuffel et al. \(2000\)](#). Segundo os autores, o efeito físico da queda de tensão em uma cavidade no isolamento, devido ao movimento de elétrons e íons positivos no instante de ocorrência da descarga parcial, de fato se assemelha ao descargamento de um capacitor. Deste modo, a forma de onda da descarga será governada pela interação entre os parâmetros do enrolamento e do capacitor inserido, de forma que representará um pulso de corrente muito rápido, com duração na faixa de nanosegundos.

Para ilustrar o efeito de geração/injeção do rápido pulso de corrente da PD pela descarga de um capacitor, o simples circuito da Figura 5.1(a) foi simulado no *simulink* do *software* MATLAB®, sendo os parâmetros arbitrariamente definidos como $C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$, $C_{ext} = 5 \text{ pF}$, $R_s = 100 \text{ } \Omega$, $R_{ext} = 1 \text{ } \Omega$ e tensão de alimentação senoidal com valor de pico 210 V , em 60 Hz . No instante de fechamento da chave, isto é, no momento de conexão do capacitor externo (C_{ext}), o pulso de corrente ilustrado na Figura 5.1(b) é obtido, o qual apresenta características de uma dupla exponencial, forma de onda normalmente utilizada na representação de descargas parciais ([Bartnikas, 2002](#); [Guillen et al., 2016](#)).

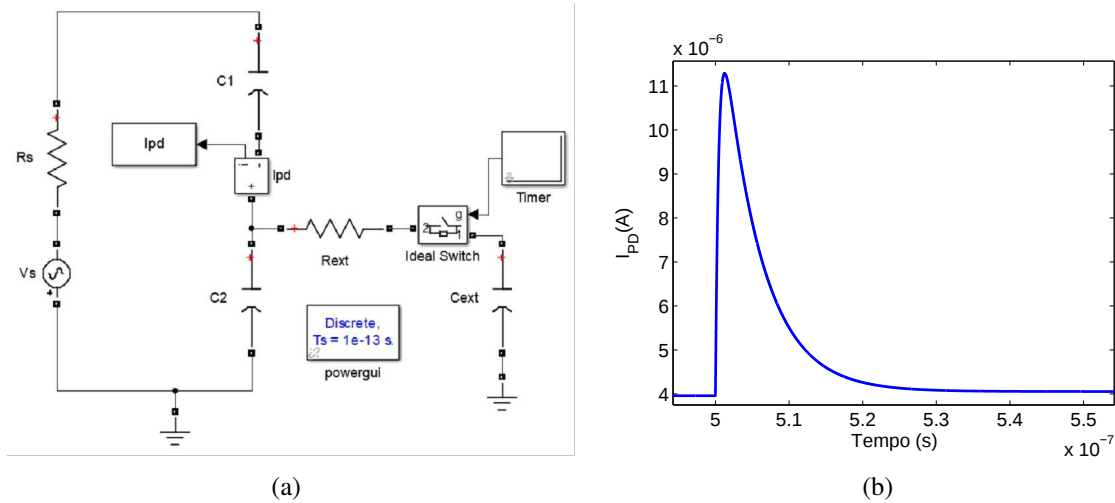


Figura 5.1: Geração de pulso da PD pela descarga de um capacitor: (a) circuito simulado; (b) forma de onda obtida.

Como nas altas frequências das PDs os efeitos capacitivos do circuito elétrico do enrolamento se mostram dominantes, fornecendo caminhos de mais baixa impedância para a propagação dos pulsos de corrente das descargas, o circuito elétrico equivalente nas proximidades do ponto de realização do distúrbio capacitivo se assemelhará ao circuito ilustrado na Figura 5.1(a), evidenciando que impulsos de corrente podem também ser gerados neste caso pela conexão de capacitores externos.

Uma vez que a magnitude das descargas capacitivas de energia está relacionada com a quantidade de carga trocada entre as capacitâncias do enrolamento e a capacitância externa inserida, o valor desta última pode ser adequadamente selecionado de forma a criar pulsos de corrente com intensidade semelhante às PDs decorrentes da degradação inicial do papel isolante, a partir do valor de tensão existente na derivação de realização do teste experimental (distúrbio), conforme mostrado na Equação (4.3). Desta maneira, os capacitores da Tabela 4.1 foram projetados, construídos e empregados na realizações dos testes experimentais deste trabalho, visando a geração/inserção de PDs com intensidade de até 5000 pC , valor admitido como ainda incipiente.

Na realização dos testes experimentais, o protótipo foi alimentado com uma tensão senoidal de aproximadamente $3,15 \text{ kV}$ (valor de pico), na primeira espira do topo da camada

externa do enrolamento, terminal onde um *HFCT* foi disponibilizado para captação dos pulsos de alta frequência resultantes dos distúrbios capacitivos. Um outro *HFCT* foi instalado na extremidade oposta do enrolamento, ou seja, na última espira da base da camada mais interna, utilizada também como terminal de aterramento. As Figuras 4.2 e 4.5 ilustram a forma de instalação dos *HFCTs*, nos quais, em cada distúrbio ocasionado nos bornes das derivações, um sinal pode ser captado, relacionado ao pulso de corrente de alta frequência que se propagou desde o ponto de conexão do capacitor externo até a extremidade de medição.

A Figura 5.2 mostra os sinais captados pelos *HFCTs* e pelo osciloscópio para distúrbios nas derivações extraídas em 88%, 45% e 12% do enrolamento, por meio da rápida conexão de capacitores de $\sim 1,81 \text{ pF}$, $\sim 3,52 \text{ pF}$ e $\sim 12,76 \text{ pF}$ entre os bornes destas derivações e a terra, respectivamente, necessários para a geração de descargas de até 5000 pC nestes pontos do protótipo, alimentado com tensão senoidal de $3,15 \text{ kV}$ de pico. Nesta Figura, os sinais do canal 1 do osciloscópio (amarelo) se referem aos níveis da tensão de alimentação existentes nos momentos de ocorrência das perturbações ($\sim 3032,5 \text{ V}$, $\sim 2761,8 \text{ V}$ e $\sim 2579,8 \text{ V}$ para os testes da Figuras 5.2(a), 5.2(b) e 5.2(c), respectivamente), os sinais do canal 2 (azul) aos pulsos de corrente captados no *HFCT* do terminal aterrado e os sinais do canal 3 (roxo) aos pulsos de corrente captados no *HFCT* do terminal de alimentação.

Pelos sinais da Figura 5.2, pode-se perceber, ainda que de forma preliminar, que os pulsos captados apresentam natureza transitória e tempos de subida da ordem de dezenas de nanossegundos (estimados pela base de tempo do osciloscópio), semelhantes às *PDs* típicas do processo de degradação dos transformadores. A prerrogativa de que os pulsos gerados correspondam às *PDs* de estágios incipientes do processo de deterioração é dada pela quantidade de carga injetada em cada distúrbio, garantida pelos valores de capacitores empregados nos testes experimentais e pela amplitude da tensão de alimentação empregada.

Para constituição de um banco de dados experimental, 10 testes, isto é, distúrbios capacitivos, foram realizados em cada uma das 12 derivações do protótipo, sendo os sinais registrados no osciloscópio posteriormente transferidos para um microcomputador para processamento.

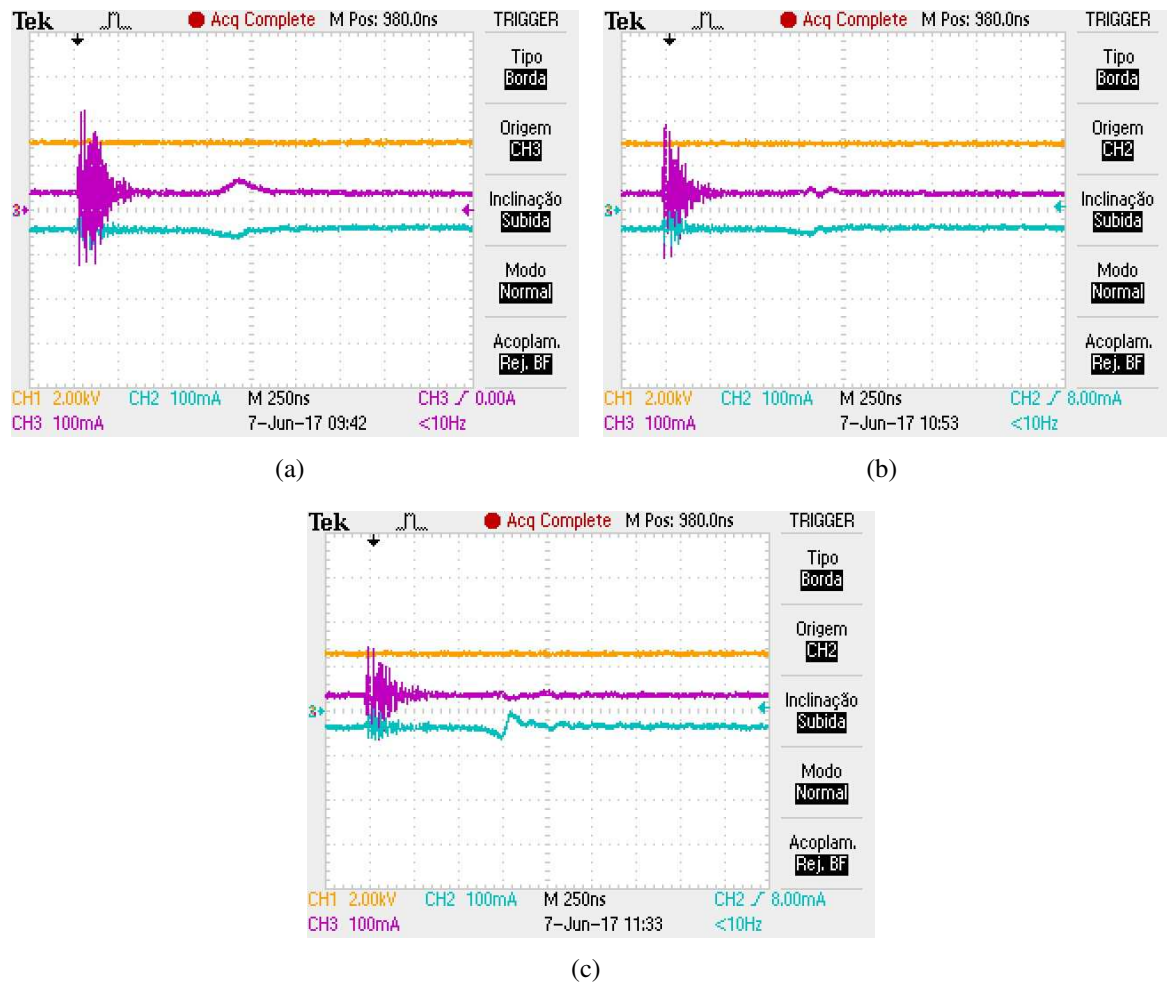


Figura 5.2: Sinais terminais no osciloscópio para distúrbio capacitivos em: (a) 88%; (b) 45%; e (c) 12% do enrolamento.

5.3 Pré-processamento dos sinais medidos

Na maioria dos sinais coletados nos testes experimentais deste trabalho, pôde-se verificar a presença de uma parte irradiada dos distúrbios capacitivos, a qual se propaga pelo ar e se acopla nos cabos de alimentação do protótipo (provavelmente), atingindo os *HFCTs* dos terminais de medição antes da parte conduzida, propagante pelos materiais do enrolamento. Por conseguinte, os sinais coletados nas extremidades do enrolamento apresentaram duas componentes, como destacado na Figura 5.3, sendo que a natureza das porções irradiadas e conduzidas pode ser confirmada examinando-se as formas de onda captadas nos dois *HFCTs* instalados. Neste sentido, pode-se notar que as oscilações do segundo transitório

se mostram com polaridades invertidas, fato resultante de sinais propagantes em direções opostas de um condutor. Por outro lado, no primeiro transitório, ocorrido nas proximidades de 0 s e responsável pelo disparo (*trigger*) do osciloscópio e início das medições, os pulsos apresentam oscilações de mesma polaridade.

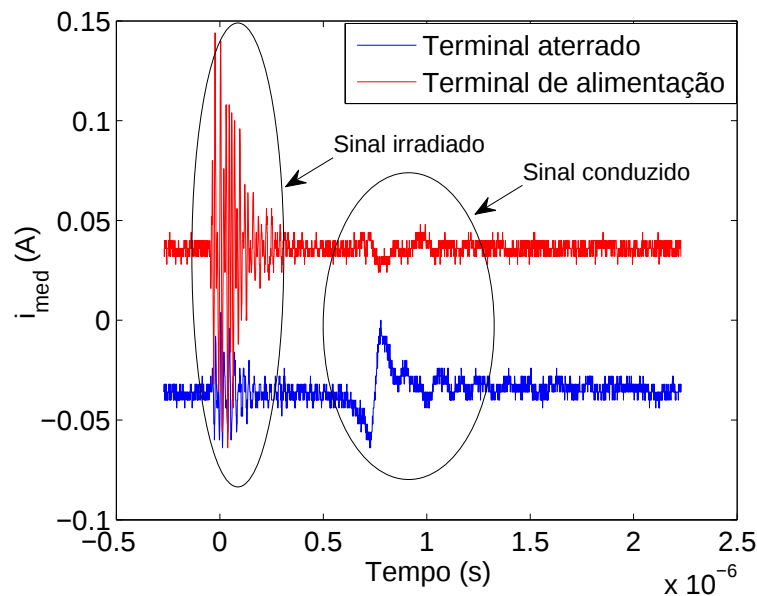


Figura 5.3: Sinais terminais medidos para distúrbio capacitivo em 12% do enrolamento.

Visto que este trabalho investiga a localização das *PDs* utilizando apenas a informação contida em sinais conduzidos, captados por meio de *HFCTs*, a porção irradiada dos sinais adquiridos deve ser removida/atenuada. Para tanto, como os sinais irradiados e conduzidos apresentam diferentes tempos de subida, e uma vez que o tempo de subida de um sinal está inversamente relacionado com a frequência equivalente do mesmo, uma investigação do espectro de frequências dos sinais terminais pode revelar as diferentes faixas de frequências das suas partes constituintes, propiciando o desenvolvimento de filtros para a atenuação das componentes indesejadas.

Como exposto em [Skibinski et al. \(1998\)](#), a frequência equivalente ao tempo de subida de um pulso pode ser aproximada pela Equação (5.1), sendo t_s o tempo necessário para o pulso ir de 10% a 90% de seu valor máximo:

$$f_{eq} = \frac{1}{\pi t_s}. \quad (5.1)$$

Para os sinais captados nos testes experimentais, pode-se constatar que as porções irradiadas e conduzidas apresentam tempos de subida de aproximadamente 6 ns e 50 ns , respectivamente, os quais, pela Equação (5.1), resultam em frequências equivalentes de $\sim 32 \text{ MHz}$ e $\sim 6 \text{ MHz}$, nesta ordem. Tomando-se o espectro de frequências do sinal captado no terminal de alimentação, para um distúrbio capacitivo realizado na derivação com 12% de espiras do enrolamento, é possível notar componentes centradas em valores relativamente próximos às frequências equivalentes estimadas, como ilustrado na Figura 5.4. Nesta mesma figura, pode-se notar também a existência de uma componente espectral de maior frequência, a qual está relacionada ao erro de quantização do processo de conversão analógico/digital do osciloscópio. A existência de tal erro pode ser melhor verificada nas formas de onda dos sinais no domínio do tempo (Figura 5.3), se apresentando na forma de pequenos patamares bem definidos, característicos do processo de atribuição de valores discretos às variáveis analógicas na conversão analógico/digital.

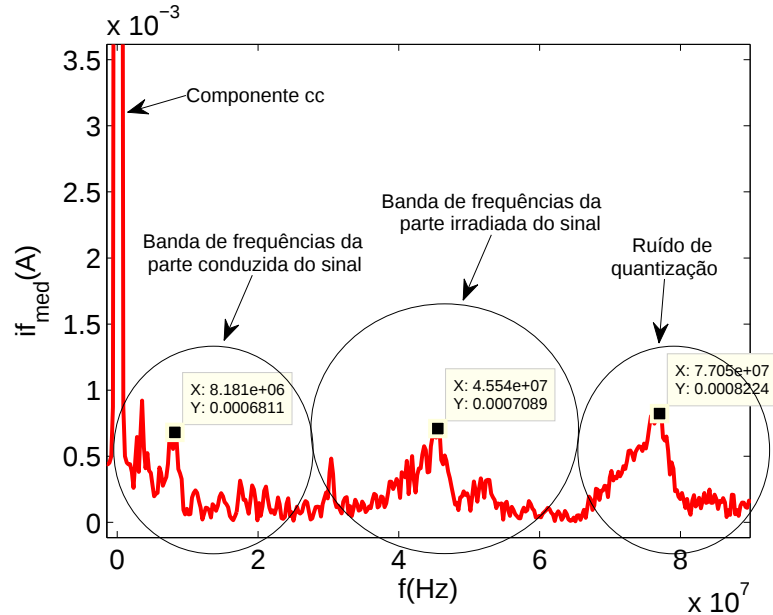


Figura 5.4: Espectro de frequências do sinal captado no terminal de alimentação para distúrbio em 12% do enrolamento.

Para remoção/atenuação da parte irradiada, assim como da porção de maior frequência verificada, relacionada ao erro de quantização do osciloscópio, os sinais medidos foram filtrados por meio de um filtro digital *FIR* (*Finite Impulse Response*) passa-baixas, com 800 coeficientes e frequência de corte em 20 *MHz*.

Além da presença de diferentes componentes de frequência, um certo deslocamento em amplitude (nível *cc*) foi também observado nos sinais medidos, como pode ser verificado nas Figuras 5.3 e 5.4, decorrente da capacidade dos *HFCTs* de captarem, também, parte da corrente de baixa frequência, circulante no enrolamento do protótipo para magnetização do seu núcleo. Uma vez que este nível *cc* pode influenciar nas características extraídas das formas de onda, o mesmo foi removido por meio de uma subtração dos sinais coletados pela média de suas 50 primeiras amostras, cujos valores refletem o nível de deslocamento existente antes da chegada dos pulsos de alta frequência aos *HFCTs*. Com isso, todas as formas de onda coletadas nos testes experimentais foram realocadas para o nível 0 *A* do eixo das correntes.

A Figura 5.5 mostra o efeito do pré-processamento dos sinais medidos nos testes experimentais, isto é, da filtragem e remoção do nível *cc* das formas de onda captadas. Pela Figura, pode-se constatar que a característica da parte conduzida do sinal permanece a mesma após o pré-processamento, de modo que a informação contida nesta porção, relacionada com o local de realização do distúrbio, não é alterada. Em contrapartida, esta informação é ressaltada com a atenuação do erro de quantização e da parcela irradiada.

5.4 Modelagem *MTL*

Para a geração de sinais por simulação computacional, a abordagem *MTL* foi empregada na modelagem do protótipo de enrolamento utilizado neste trabalho. Para tanto, a partir das matrizes de impedância e admitância deste sistema, obtidas a partir das matrizes de capacitâncias, indutâncias, resistências e condutâncias do mesmo, conforme Equações (3.11) e (3.12), as correntes nas extremidades do enrolamento, para pulsos de corrente de *PDs* injetados ao longo de sua extensão, podem ser simuladas pelas Equações (3.9) e (3.10).

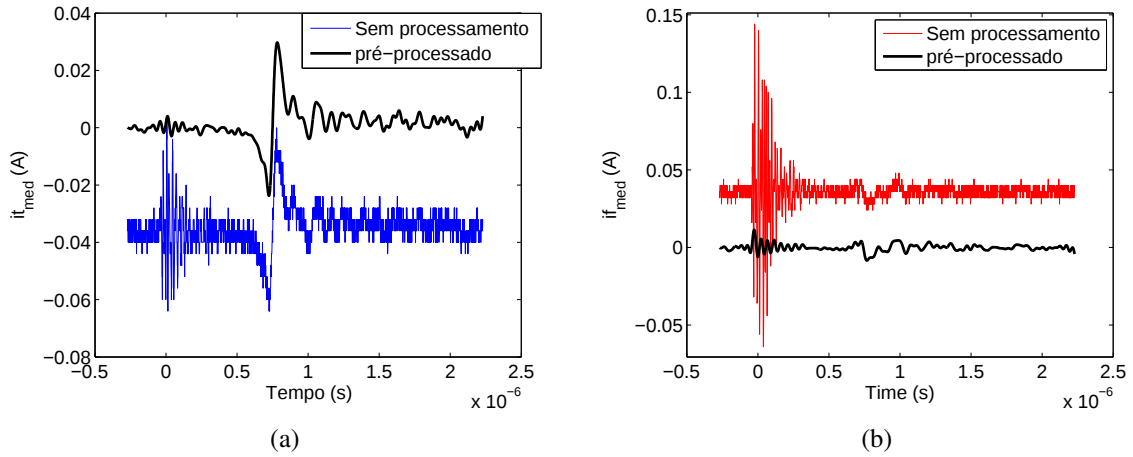


Figura 5.5: Pré-processamento dos sinais medidos para distúrbio capacitivo em 12% do enrolamento: (a) terminal aterrado; (b) terminal de alimentação.

5.4.1 Obtenção dos parâmetros do protótipo

A Figura 5.6 ilustra a estrutura do enrolamento estudado neste trabalho, assim como os principais acoplamentos capacitivos considerados na sua modelagem, sendo: C_e , as capacitâncias existentes entre espiras adjacentes de uma mesma camada, cujo dielétrico é o verniz isolante dos condutores; C_c as capacitâncias entre espiras adjacentes de camadas adjacentes, com dielétrico composto pelo verniz e pela camada de papel isolante; e C_t as capacitâncias entre as espiras da camada mais interna e o núcleo aterrado, com dielétrico semelhante ao da capacitância C_c .

De modo geral, e como realizado na maioria dos trabalhos da literatura, as capacitâncias do protótipo podem ser estimadas por meio de simples equações analíticas, considerando clássicas configurações de capacitores e utilizando as características construtivas do enrolamento. Desta forma, a capacitância C_e pode ser calculada pela equação da capacitância entre dois fios circulares em paralelo e as capacitâncias C_c e C_t pela equação do capacitor cilíndrico, disponibilizadas no apêndice B. Para as dimensões do protótipo e considerando que o verniz isolante tenha permissividade relativa $\varepsilon_r \sim 3,3^1$ e o papel $\varepsilon_r \sim 3,01^0$, os seguintes valores foram estimados: $C_e \simeq 173,84 \text{ pF/m}$, $C_c \simeq 54,22 \text{ pF/m}$ e $C_t \simeq 0,36 \text{ pF/m}$. Neste

¹ Valores fornecidos pelos fabricantes.

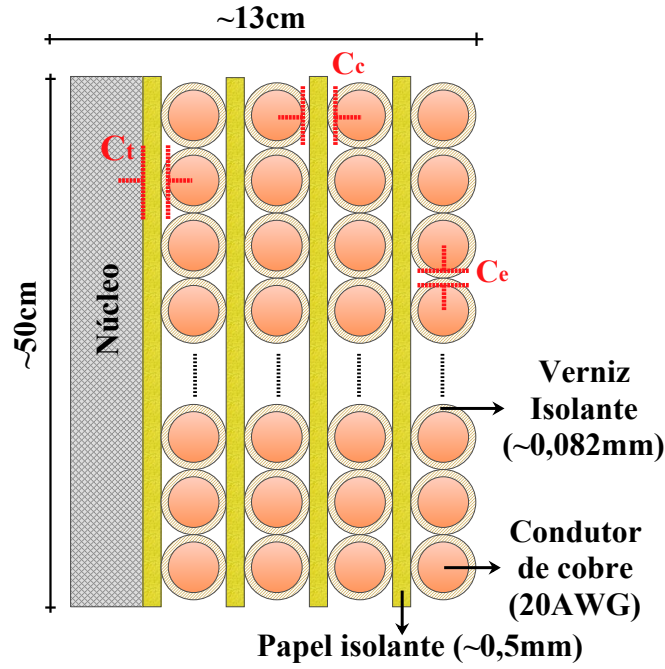


Figura 5.6: Estrutura do enrolamento do protótipo e principais acoplamentos capacitivos.

ponto, é importante ressaltar que quando o acoplamento capacitivo contempla mais de um meio dielétrico, como no caso de C_c e C_t , a capacitância total é calculada como se estes diferentes meios constituíssem diferentes capacitores, associados em série (Halliday *et al.*, 2008).

Se cada espira do enrolamento for tratada como uma linha de transmissão, a matriz de capacitâncias ($\mathbf{C}$) é constituída de forma que os elementos da diagonal principal (C_{ii}) são dados pelo somatório de todas as capacitâncias conectadas ao i -ésimo condutor, enquanto os outros elementos (C_{ij}) são iguais ao negativo das capacitâncias existentes entre determinados condutores i e j (Jafari e Akbari, 2007; Popov *et al.*, 2007; Hosseini *et al.*, 2008).

Com a matriz de capacitâncias do enrolamento obtida, a forma mais fácil e direta de se obter as matrizes de indutâncias ($\mathbf{L}$) e de condutâncias ($\mathbf{G}$) do enrolamento, é considerando que o sistema isolante do mesmo seja homogêneo, de forma que as aproximações mostradas nas Equações (5.2) e (5.3) possam ser empregadas, sendo ε_{req} a permissividade relativa equivalente do isolamento, $\tan\delta$ o fator de dissipação² do mesmo e c a velocidade da luz no vácuo (Jafari e Akbari, 2007; Popov *et al.*, 2007; Paul, 2008). Para o protótipo do enrolamento, foi

²Também conhecido como Tangente de Perdas. De certo modo, quantifica as perdas em um dielétrico.

considerado $\varepsilon_{req} \simeq 2,30$, valor estimado por meio de processo inverso a partir das equações utilizadas no cálculo das capacitâncias do enrolamento e respectivos valores obtidos, e um fator de dissipação conforme àquele apresentado em [Hettiwatte et al. \(2002\)](#) para o papel *Nomex*^{®3}, descrito na Equação (5.4).

$$L = \frac{\varepsilon_{req} \mathbf{C}^{-1}}{c^2}, \quad (5.2)$$

$$G = w \mathbf{C} \tan \delta, \quad (5.3)$$

$$\tan \delta = 0,07 \left[1 - 0,857 e^{-(0,308 \times 10^{-6} f)} \right]. \quad (5.4)$$

Para o cálculo das resistências e constiuição da matriz $\mathbf{R}$, foi utilizada a clássica equação da resistência elétrica de condutores, considerando o efeito pelicular que, em altas frequências, altera a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas. Desta forma $R \sim 0,102 \times 10^{-3} \sqrt{f} \, \Omega/m$.

5.4.2 Simulação computacional

A modelagem *MTL* do enrolamento construído foi implementada no domínio da frequência no *software* MATLAB[®]. Para reduzir o tempo de processamento, as espiras foram agrupadas, de acordo com procedimento descrito em [de Leon e Semlyen \(1992\)](#), possibilitando uma redução das dimensões das matrizes do sistema sem alteração substancial das características do mesmo. Neste sentido, foi utilizado um fator de agrupamento de 6, proporcionando uma redução das matrizes envolvidas da ordem de 1752 para 292.

Os pulsos de corrente das *PDs* foram representados por meio de duplas exponenciais, com tempos de subida de 50 ns e quantidade de carga aleatória entre $-5000 \, pC$ e $+5000$

³Além da celulose, possui fibras de aramida em sua composição, tendo suas propriedades elétricas menos afetadas pela umidade do que o papel *Kraft* ([Quadros, 2006](#)).

pC , valores relativos aos níveis das descargas parciais em condições ainda incipientes da degradação do isolamento sólido e equivalentes àqueles dos testes experimentais realizados.

Ao todo, 50 simulações foram realizadas para cada ponto de derivação do enrolamento, ou seja, 50 pulsos de PDs foram injetados em cada uma das 12 derivações do modelo do protótipo, sendo os pulsos de corrente nas extremidades do enrolamento determinados, no domínio da frequência. Neste caso, utilizou-se como impedâncias terminais $Z_t \sim 0,8 \mu H$, relacionada ao cabo existente entre o final do enrolamento e o ponto de aterramento, e $Z_f \sim 3 nF$, relativa ao transformador elevador empregado na alimentação do protótipo, valores pressupostos.

As simulações foram realizadas para uma faixa de frequências entre $1 kHz$ e $20 MHz$, com passo de $5 kHz$, sendo as correntes nas extremidades do enrolamento convertidas para o domínio do tempo por meio da transformada inversa de Fourier, por meio da FFT . Para que os sinais simulados apresentassem uma mesma frequência de amostragem dos sinais experimentalmente medidos, os mesmos foram também reamostrados, no domínio do tempo.

5.5 Extração de características

Os sinais de corrente resultantes nas extremidades dos enrolamentos, para PDs ocorridas no interior dos mesmos, apresentam diferentes formas de onda, em virtude, principalmente, dos diferentes caminhos de propagação encontrados pelos pulsos de alta frequência das descargas até os terminais de medição, isto é, devido às diferentes impedâncias experimentadas pelas PDs . Tais diferenças se manifestam, principalmente, nos perfis oscilatórios e nas amplitudes dos sinais terminais, como pode ser preliminarmente notado na Figura 5.2. Desta forma, pode-se constatar que os sinais terminais transportam, inerentemente, informação relacionada aos locais de ocorrência das PDs , podendo de fato ser empregados na localização destas descargas.

Para fins de aprendizagem de máquinas e reconhecimento de padrões em sinais, entretanto, é necessário reduzir a dimensão dos dados das formas de onda, que é muito grande

para ser processada por algoritmos de classificação. Assim, é necessário realizar um mapeamento dos sinais captados em um espaço de características de menor dimensão, de forma a obter um conjunto de informações mais adequado para a localização das *PDs*.

Por se tratar de um espaço de características de maior simplicidade, rapidez de obtenção e com relativo desempenho na separação dos pulsos de corrente das *PDs* em distintas classes, como mostrado nos trabalhos de Kuo (2010), Rotby *et al.* (2012), dentre outros, optou-se por extrair características estatísticas dos sinais terminais captados. Desta forma, a média (μ), o desvio padrão (σ), a *skewness* (sk) e a *kurtosis* (ku), além da energia (E) e da carga aparente (Q_{ap}), anteriormente definidos na Seção 3.3, foram calculados para cada pulso de alta frequência, captados no terminal de alimentação (fase) e de aterramento (terra) nos experimentos e simulações computacionais realizadas. Com isso, a forma de onda de cada sinal terminal, que possui aproximadamente 2500 amostras, pode ser representada como apenas 6 pontos no espaço de características.

A Tabela 5.1 sumariza as variáveis estatísticas extraídas dos sinais terminais obtidos em cada teste experimental/computacional:

Tabela 5.1: Variáveis características estatísticas extraídas dos sinais terminais.

Variável	Definição
μ_f	Média do sinal coletado na fase
μ_t	Média do sinal coletado na terra
σ_f	Desvio padrão do sinal coletado na fase
σ_t	Desvio padrão do sinal coletado na terra
sk_f	<i>Skewness</i> do sinal coletado na fase
sk_t	<i>Skewness</i> do sinal coletado na terra
ku_f	<i>Kurtosis</i> do sinal coletado na fase
ku_t	<i>Kurtosis</i> do sinal coletado na terra
E_f	Energia do sinal coletado na fase
E_t	Energia do sinal coletado na terra
Q_{apf}	Carga aparente do sinal coletado na fase
Q_{apt}	Carga aparente do sinal coletado na terra

A análise de componentes principais (*PCA*) foi também empregada no levantamento de características dos sinais terminais deste trabalho, principalmente para fins de comparação de desempenho na localização das *PDs* com as características estatísticas. As componentes

principais foram calculadas sob uma matriz formada pelos sinais de corrente dos terminais de alimentação (I_f) e de aterramento (I_t) dispostos em colunas, para cada teste experimental/computacional. De modo geral, os seguintes passos foram empregados, conforme procedimento exposto em [Shlens \(2014\)](#):

1. organização da matriz de dados $[I_f \ I_t]_{2500 \times 2}$;
2. cálculo da matriz de covariâncias⁴;
3. cálculo dos autovalores e autovetores da matriz de covariâncias;
4. ordenação dos autovetores em ordem decrescente dos valores dos autovalores. Tais autovetores correspondem às componentes principais (PC) dos sinais, em ordem decrescente de variância (importância).

Pelo procedimento acima, como apenas duas variáveis (dimensões) são utilizadas, relacionadas aos dois sinais de corrente captados nas extremidades do enrolamento, apenas duas componentes principais podem ser obtidas. Cada uma destas componentes, no entanto, possui 2 coeficientes. Tomando-se cada coeficiente como uma característica para a investigação das PDs , o conjunto de 4 características PCA mostrado na Tabela 5.2 pode ser obtido. Neste ponto, fica evidente a expressiva redução na dimensão dos dados proporcionada pela PCA , das 5000 amostras das formas de onda das correntes I_f e I_t para apenas 4 pontos característicos.

Tabela 5.2: Variáveis características PCA extraídas dos sinais terminais.

Variável	Definição
PC_{11}	Coeficiente 1 da primeira componente principal
PC_{12}	Coeficiente 2 da primeira componente principal
PC_{21}	Coeficiente 1 da segunda componente principal
PC_{22}	Coeficiente 2 da segunda componente principal

A extração de características das formas de onda foi realizada tanto para os sinais terminais advindos dos testes experimentais quanto para os sinais de simulação. Para ambos os casos,

⁴De certa forma, uma medida da relação entre as variáveis. Deve ser calculada para os dados subtraídos de seus valores médios, para uma centralização dos valores.

os valores obtidos para cada variável característica foram agrupados em vetores, de acordo com o ponto de ocorrência da descarga nas derivações do protótipo. Para as características μ_f e PC_{11} , por exemplo, os vetores característicos descritos nas Equações (5.5) e (5.6) foram organizados, respectivamente, sendo $nt = 10$ e $nt = 50$ o número de testes realizados experimentalmente e em simulações computacionais, nesta ordem. Nestas Equações, os valores percentuais entre parênteses indicam o percentual de espiras envolvido em cada ponto de ocorrência/injeção da descarga parcial, sendo os pontos característicos organizados sucessivamente a partir da derivação com maior número de espiras. Para os dados experimentais, os vetores característicos apresentam dimensão 1×120 , enquanto para os dados de simulação dimensão 1×600 .

$$\boldsymbol{\mu_f} = \begin{bmatrix} \mu_f(95\%)_1 & \cdots & \mu_f(95\%)_{nt} & \cdots & \cdots & \mu_f(5\%)_1 & \cdots & \mu_f(5\%)_{nt} \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

$$\boldsymbol{PC_{11}} = \begin{bmatrix} PC_{11}(95\%)_1 & \cdots & PC_{11}(95\%)_{nt} & \cdots & \cdots & PC_{11}(5\%)_1 & \cdots & PC_{11}(5\%)_{nt} \end{bmatrix}. \quad (5.6)$$

5.6 Ajuste dos modelos *MLR*

Os modelos de Regressão Linear Múltipla (*MLR*), utilizados na localização das *PDs* ao longo dos enrolamentos de transformadores, foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados empregando-se o procedimento *Stepwise*, que possibilita a obtenção de modelos *MLR* com variáveis e termos de fato significativos para a resposta de interesse. Para tanto, a partir de um modelo inicial, termos são adicionados ou removidos, um a um, por meio de comparações dos valores dos testes *F*–estatístico (ou *t*–estatístico), ou *p*–valores associados, com limiares preestabelecidos.

Como variáveis independentes, foram utilizadas as variáveis características estatísticas e *PCA* extraídas dos sinais simulados, separadamente. Antes do ajuste propriamente dito dos

modelos *MLR* de localização, no entanto, estas variáveis características foram normalizadas e separadas em dois conjuntos de dados, um para a construção dos modelos, isto é, para a constituição da matriz $\mathbf{x}$ necessária na regressão (Equação (3.31)), composto por 60% dos dados, e outro para a validação dos mesmos, com os 40% restantes dos dados. Este último procedimento é fundamental para uma verificação da capacidade de resposta dos modelos obtidos frente a dados ainda desconhecidos.

A variável dependente, ou seja, a resposta/saída de interesse dos modelos *MLR*, foi imposta na regressão dos mesmos (constituição do vetor $\mathbf{y}$ da Equação (3.31)) como o percentual de espiras correspondente em cada ponto de ocorrência das *PDs*, tomando-se como referência o terminal aterrado do enrolamento.

Com o objetivo de se determinar qual estrutura polinomial é mais adequada para localização das *PDs*, assim como quais variáveis características são mais significativas para o mesmo propósito, quatro diferentes modelos *MLR* foram ajustados pelo método *Stepwise*, a partir de um modelo inicial de primeira ordem com todas as variáveis: i) modelo de 1ª ordem sem interações entre termos; ii) modelo de 1ª com interações; iii) modelo de 2ª ordem sem interações; e iv) modelo de 2ª ordem com interações. Todos estes modelos foram ajustados utilizando-se apenas o conjunto de dados de simulação de características estatísticas ou *PCA*, reservados para a construção dos modelos *MLR*.

Para os quatro modelos *MLR* obtidos, a *ANOVA* foi realizada para confirmar e comparar a significância dos mesmos, por meio dos testes *F*—estatísticos, para verificação da significância da regressão e de conjuntos de termos, e *t*—estatístico, para a significância de variáveis e termos individuais; e para verificar a qualidade do ajuste como um todo, por meio dos coeficientes de determinação múltipla, R^2 e R_{adj}^2 , e do erro médio quadrático, *RMSE*. Em seguida, foi realizada uma análise residual gráfica dos modelos, para uma certificação das premissas adotadas na modelagem, como a normalidade e variância constante dos resíduos, linearidade e independência das observações. Então, os modelos construídos foram validados, por meio da apresentação do conjunto de dados separado para este propósito, e o percentual

de acertos calculado, de acordo com um determinado valor de erro admissível (δ). Neste ponto, um acerto é considerado com uma saída estimada pelo modelo *MLR*, correspondente a um determinado local de ocorrência das *PDs* dos dados característicos de validação, que se encontra no interior de uma região esperada, constituída por uma variação de $\pm\delta$ do real local de ocorrência das descargas, cujo ponto é conhecido.

Dentre os 4 modelos ajustados, analisados e validados, a melhor estrutura *MLR* para localização das *PDs* foi selecionada pela averiguação daquela que apresenta um melhor compromisso entre R_{adj}^2 , *RMSE*, complexidade e número de termos, satisfação das premissas de modelagem e percentual de acertos na validação.

Em síntese, o processo de determinação do modelo *MLR* de localização das *PDs* é realizado de acordo com as seguintes etapas:

- i) ajuste de um modelo *MLR* inicial;
- ii) emprego do método *Stepwise*, a partir do modelo anterior, na obtenção de 4 diferentes estruturas *MLR*: modelo polinomial de 1ª ordem sem interações entre termos, modelo de 1ª ordem com interações, 2ª ordem sem interações e 2ª ordem com interações;
- iii) análise de variância (*ANOVA*) dos modelos, de acordo com um determinado nível de significância (α);
- iv) verificação das premissas de modelagem, pela análise residual gráfica;
- v) validação e cálculo do percentual de acertos de cada modelo, para um determinado limiar de erro admissível (δ);
- vi) determinação da melhor estrutura, como um compromisso dos resultados obtidos nas etapas *iii*, *iv* e *v*.

Neste trabalho, as etapas empregadas no ajuste e validação do modelo *MLR* são realizadas apenas com características de sinais terminais obtidos por simulações computacionais.

No entanto, para comprovar a aplicabilidade da técnica de localização para casos mais próximos da realidade, o melhor modelo identificado, para o caso do protótipo, é testado para as características resultantes dos testes experimentais realizados neste enrolamento, sendo o percentual de acertos nesta condição calculado para mensuração do desempenho.

5.7 Considerações do Capítulo

Neste Capítulo, descreveu-se o procedimento experimental proposto para a geração de pulsos de alta frequência similares às *PDs*, por meio da realização de distúrbios capacitivos em derivações de enrolamentos, e a estratégia de localização empregada na localização destas descargas, mediante modelos de regressão (*MLR*) ajustados com características estatísticas e *PCA* de sinais advindos de simulações computacionais pela *MTL*.

A metodologia apresentada será avaliada nos próximos Capítulos, por meio dos principais resultados e conclusões obtidas.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 Introdução

Este Capítulo expõe os principais resultados obtidos no projeto de doutoramento.

Em um primeiro momento, são abordados os resultados alcançados para o protótipo de enrolamento construído e considerado neste trabalho (*layer-type* com 4 camadas). Neste sentido, inicialmente, é realizada uma comparação entre algumas formas de onda das extremidades do enrolamento, resultantes de simulações *MTL* e de distúrbios capacitivos experimentais ao longo do mesmo, assim como entre características extraídas destes sinais. Então, o desempenho de modelos *MLR* ajustados pelo procedimento descrito na Seção 5.6 é avaliado, principalmente no que concerne à estimação dos locais de ocorrência dos pulsos de corrente dos sinais experimentalmente medidos.

Em seguida, dois estudos de casos são analisados, quanto a possibilidade de aplicação da metodologia *MLR* na localização de *PDs* em enrolamentos de transformadores utilizados na literatura, como em um enrolamento *layer-type* composto por um maior número de camadas que o protótipo deste trabalho e um enrolamento com configuração *disk-type*.

Em todas as situações consideradas, o desempenho dos modelos *MLR* na localização das

PDs é comparado ao desempenho de $ANNs$ do tipo *feed-forward*¹, técnica classicamente empregada na classificação de sinais, como a classificação das PDs quanto aos locais de ocorrência. As redes neurais foram avaliadas no mesmo conjunto de dados utilizados nos modelos de regressão, sendo a melhor estrutura determinada como àquela que apresenta um melhor compromisso entre menor complexidade e maior percentual de acertos na validação, variando-se o número de camadas escondidas entre 1 e 2, o número de neurônios em cada camada entre 5 e 25 e a função de ativação dos neurônios entre linear, tangente sigmóide e logaritmo sigmóide. O treinamento foi realizado por meio do algoritmo *backpropagation*², empregando uma taxa de aprendizagem de 0,5.

6.2 Localização das PDs no protótipo construído

No ajuste dos modelos MLR , limiares de entrada e saída de termos para o *Stepwise* foram estabelecidos como $p_{entrada} = p_{saida} = 0,05$. Para a $ANOVA$, foi adotado um nível de significância de 5% nos testes estatísticos, de modo que $\alpha = 0,05$.

O desempenho da MLR e da ANN na validação com dados de simulação e no teste com dados experimentais foi analisado admitindo percentuais de erro de aproximadamente $\delta = \pm 8\%$, correspondente ao número médio de espiras existente entre cada derivação do enrolamento, e $\delta = \pm 12,5\%$, relativo ao número de espiras presente na metade de cada camada do mesmo.

6.2.1 Comparação entre sinais simulados e medidos

A Figura 6.1 apresenta uma comparação entre algumas formas de onda terminais obtidas pela simulação MTL do protótipo, considerando os parâmetros descritos na Seção 5.4.1, e formas de onda obtidas pelo procedimento experimental proposto neste trabalho, onde os

¹Redes neurais onde os sinais se difundem apenas da entrada para a saída, ou seja, em que não há realimentação (Haykin e Veen, 1999).

²Algoritmo baseado na regra de correção do erro de aprendizagem, utilizado no ajuste dos pesos das conexões entre os neurônios de uma ANN (Haykin e Veen, 1999).

capacitores de $\sim 1,81 \text{ pF}$, $\sim 3,52 \text{ pF}$ e $\sim 12,76 \text{ pF}$ foram empregados na realização de distúrbios nas derivações em 88%, 45% e 12% do enrolamento, respectivamente, alimentado com tensão senoidal de pico $3,15 \text{ kV}$. Tais valores, propiciam a geração de descargas experimentais com intensidade de $\sim 5000 \text{ pC}$, como pode ser notado pela Equação 4.3, considerando-se os níveis de tensão instantâneos disponíveis nas derivações no momento da conexão dos capacitores externos ($-2,97 \text{ kV}$, $2,94 \text{ kV}$ e $2,83 \text{ kV}$ para as derivações em 88%, 45% e 12%, nesta ordem). Nas respectivas simulações, as duplas exponenciais representativas das *PDs* foram consideradas com quantidade de carga de -5000 pC para descarga em 88% do enrolamento, e $+5000 \text{ pC}$ para descargas em 45% e 12% do enrolamento.

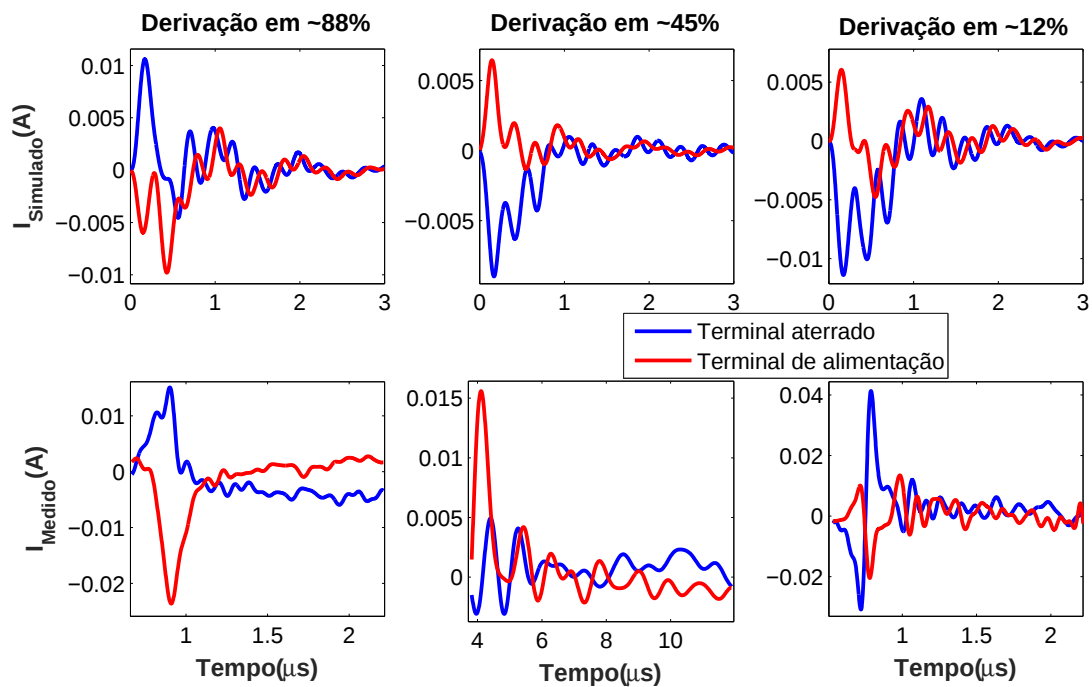


Figura 6.1: Comparação entre os sinais terminais simulados e medidos no protótipo.

Confrontando os sinais medidos e simulados, pode-se notar significativas divergências nas formas de onda obtidas nas extremidades do enrolamento, tanto com relação às amplitudes quanto com relação às frequências das oscilações. Todavia, os resultados se mostram coerentes, principalmente no que diz respeito aos rápidos tempos de subida dos sinais e aos perfis oscilatórios para *PDs* em diferentes derivações do enrolamento. Neste sentido, sinais de mesma polaridade e de formato moderadamente parecidos puderam ser obtidos nos terminais

de alimentação e de aterramento.

De modo geral, as desigualdades entre as formas de onda medidas e simuladas podem ser atribuídas a diversas simplificações empregadas na simulação *MTL* do protótipo como, principalmente: i) estimação das capacitâncias do enrolamento considerando simples configurações de capacitores e valores aproximados para as permissividades relativas dos meios dielétricos ($\varepsilon_r = 3,0$ para o papel e $\varepsilon_r = 3,3$ para o verniz isolante); ii) estimação da matriz de indutâncias e de condutâncias por meio da matriz de capacitâncias, considerando o sistema isolante como homogêneo e com uma permissividade relativa equivalente ($\varepsilon_{req} = 2,30$); iii) aproximação da $\tan\delta$ do isolamento como sendo do papel Nomex[®], que apresenta propriedades diferentes do papel *filmepel* empregado no protótipo; iv) utilização de valores presumidos para as impedâncias terminais do enrolamento ($Z_f = 3 \text{ nF}$ e $Z_t = 0,8 \text{ }\mu\text{H}$); e v) realização de agrupamento de espiras para exequibilidade da simulação computacional.

Apesar das diferenças verificadas entre as formas de onda terminais simuladas e medidas, quando características estatísticas são calculadas sob estes sinais, em conjunto com a energia e a carga aparente, e normalizadas, padrões variacionais bastante semelhantes podem ser identificados para a maioria das variáveis extraídas, com relação aos locais de ocorrências de *PDs*/distúrbios com magnitudes aleatórias entre $\pm 5000 \text{ pC}$ ao longo do enrolamento, como ilustrado na Figura 6.2. Ainda que indiretamente, tal fato corrobora a forma proposta para a geração experimental dos pulsos das *PDs* proposta neste trabalho, considerando que sinais de descargas elétricas possam ser adequadamente representados por meio de duplas exponenciais em simulações computacionais.

A Figura 6.3 mostra os padrões variacionais resultantes de características *PCA* extraídas dos sinais terminais medidos e simulados, onde pode-se notar uma pior correspondência entre os valores obtidos, com relação as variáveis características estatísticas. Não obstante, os pontos característicos de algumas derivações, principalmente daquelas localizadas no início (95%) e no final (12,5% e 5%) do enrolamento apresentaram certa similaridade.

De certo modo, quanto melhor o comportamento variacional entre as características ex-

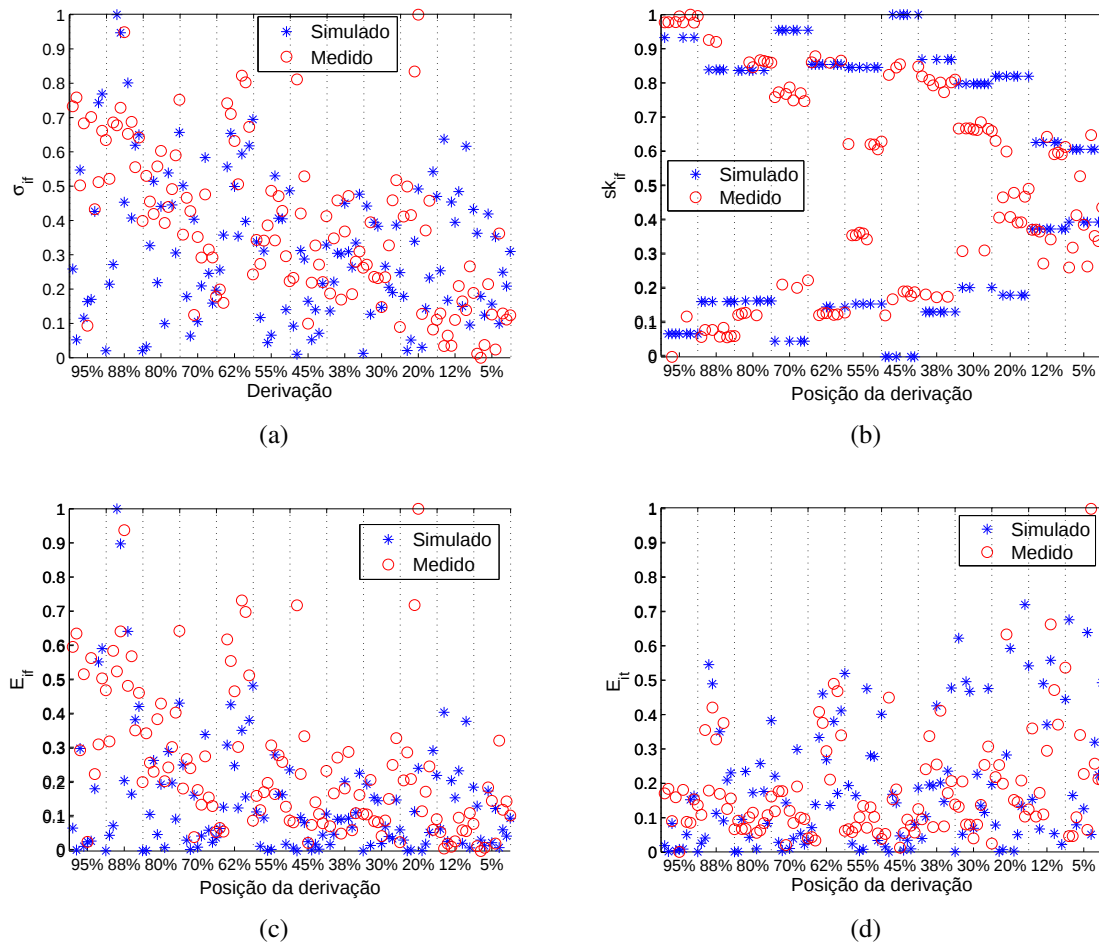


Figura 6.2: Características estatísticas extraídas dos sinais terminais simulados e medidos no protótipo: (a) σ_{it} ; (b) sk_{it} ; (c) E_{if} ; e (d) E_{it} .

traídas de sinais simulados e medidos, maior a possibilidade de se obter métodos de classificação desenvolvidos com o primeiro tipo de dados na distinção das classes presentes no segundo. Desta forma, como será visto adiante, as características estatísticas extraídas dos sinais terminais possibilitam uma melhor determinação do local de ocorrência das PDs do que as características PCA .

6.2.2 Desempenho para características estatísticas

Dentre 4 modelos MLR ajustados pelo procedimento descrito na Seção 5.6, utilizando apenas características estatísticas, em conjunto com a energia e a carga aparente, advindas

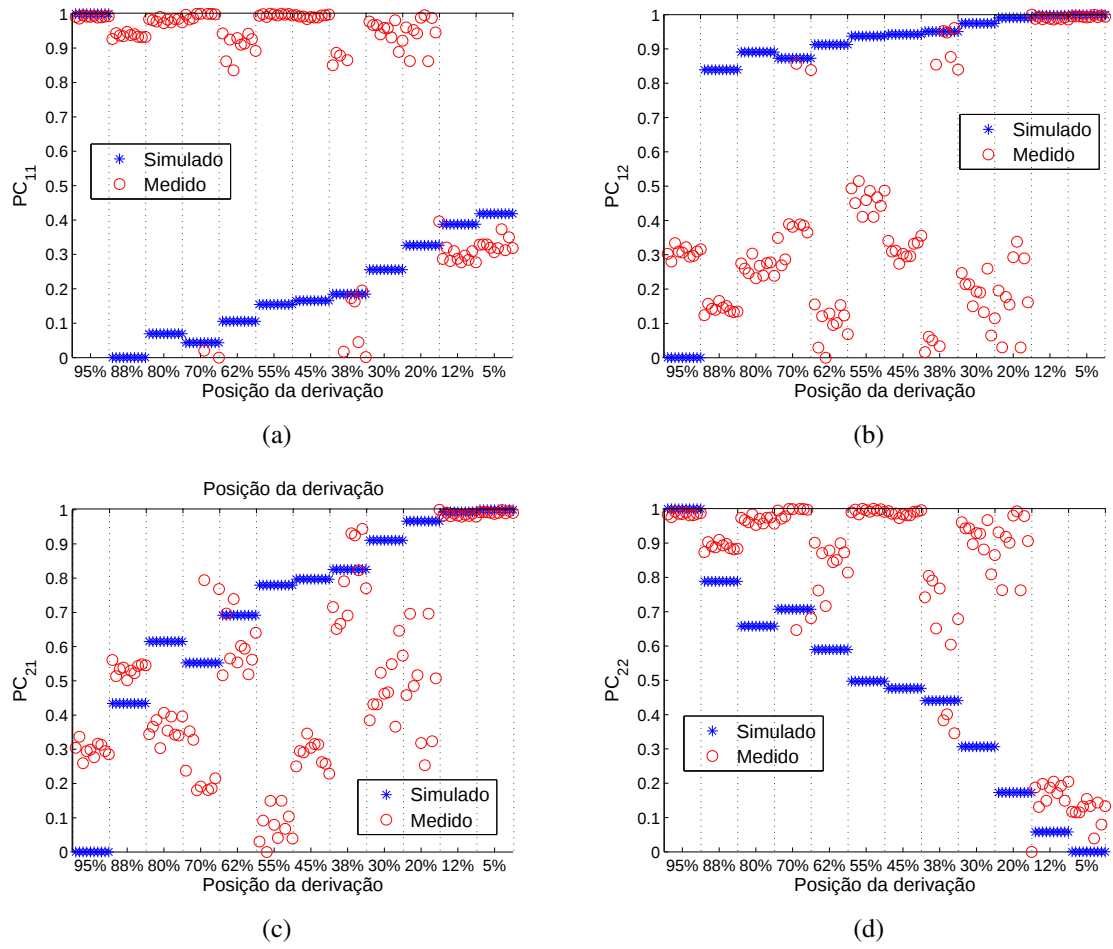


Figura 6.3: Características PCA extraídas dos sinais terminais simulados e medidos no protótipo: (a) PC_{11} ; (b) PC_{12} ; (c) PC_{21} ; e (d) PC_{22} .

dos sinais terminais de simulação, o melhor modelo obtido, ou seja, o modelo que apresenta um melhor compromisso entre R_{adj}^2 , $RMSE$, complexidade e número de termos, satisfação das premissas de modelagem e percentual de acertos na validação, foi identificado como um modelo de 1ª ordem sem interações, como mostrado na Equação 6.1:

$$y = 0,20 + 2,63\sigma_{if} - 2,22\sigma_{it} + 0,17sk_{if} + 0,48ku_{it} - 1,36E_{if} + 1,07E_{it}. \quad (6.1)$$

Uma vez que o modelo ajustado para características estatísticas possui apenas termos lineares e uma constante, assim como o modelo preliminar utilizado em sua obtenção, pode-se

constatar que o método *Stepwise* de ajuste realizou apenas uma seleção das variáveis mais significativas, ou seja, selecionou as variáveis que melhor explicam a variabilidade dos dados de entrada perante a saída imposta na regressão.

As Tabelas 6.1 e 6.2 retratam a *ANOVA* do modelo *MLR* da Equação (6.1). Pela Tabela 6.1, pode ser notado que o modelo ajustado é capaz de explicar aproximadamente 93,4% dos dados característicos utilizados em sua obtenção ($R_{adj}^2 = 0,934$) e, uma vez que $R_{adj}^2 \simeq R^2$, as variáveis presentes são de fato significativas. De outro modo, a boa qualidade de ajuste do modelo pode ser quantificada pelo erro médio quadrático, cujo valor é de apenas $RMSE = 0,072$, e pelo índice F_0 da regressão ou p_{valor} associado, cujos valores são maiores e menores que o valor relacionado na tabela da distribuição F de Fisher-Snedecor, para um nível de significância de 5% (apêndice C), ou que este próprio nível, respectivamente. Pela Tabela 6.2, uma vez que os índices t_0 são superiores aos valores referentes da tabela da distribuição t de Student (apêndice D), ou que os p -valores associados a esta estatística são menores que o nível de significância considerado ($\alpha = 0,05$), pode-se constatar que todas as variáveis mantidas no modelo pelo método *Stepwise* são de fato significativas para a determinação do local de ocorrência das *PDs*.

Tabela 6.1: Análise de variância para o modelo da Equação (6.1).

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	F_0	p_{valor}
Regressão	34,63	6	1100,70	0
Erro	2,41	459		
Total	37,03	465		
$R^2 = 0,935$		$R_{adj}^2 = 0,934$		$RMSE = 0,072$

Tabela 6.2: Teste t -estatístico para o modelo da Equação (6.1).

Termo	Coefficiente estimado	t para H0	p_{valor}
<i>constante</i>	0,20	14,09	0
σ_{if}	2,63	26,65	0
σ_{ig}	-2,22	-25,03	0
sk_{if}	0,17	12,38	0
ku_{ig}	0,48	30,09	0
E_{if}	-1,36	-14,99	0
E_{ig}	-1,07	13,91	0

Na Figura 6.4 são disponibilizados os gráficos para a análise residual do modelo *MLR* da Equação (6.1) e verificação das suposições adotadas no seu desenvolvimento. Como os pontos estão distribuídos aparentemente como uma linha reta no gráfico da probabilidade normal dos resíduos (Figura 6.4(a)), nenhum desvio expressivo da suposição de normalidade pode ser notado, certificando as análises realizadas pelos testes *F* e *t* estatísticos. No entanto, uma vez que os pontos não estão simetricamente distribuídos em torno de 0 no gráfico dos resíduos pela resposta estimada (Figura 6.4(b)) e de forma aleatória no gráfico dos resíduos pela ordem de coleta das observações (Figura 6.4(c)), certa violação da premissa de homocedasticidade (variância constante) parece ocorrer. Para a solução deste problema, de acordo com Montgomery e Runger (2011), uma simples transformação da variável de saída deve ser suficiente como, por exemplo, adotar $\sqrt{y}$, $\ln(y)$ ou $1/y$ como resposta na regressão.

O desempenho do modelo na classificação de pontos ainda desconhecidos é verificado no processo de validação, em que o conjunto de dados destinado para este propósito é apresentado e as respostas fornecidas pelo modelo analisadas. Neste procedimento, o modelo *MLR* descrito pela Equação (6.1) apresenta percentuais totais de acertos de 78,33% e 83,33% na localização, para $\delta = \pm 8\%$ e $\delta = \pm 12,5\%$, respectivamente, indicando uma boa capacidade de predição, ainda que para dados de simulação.

Para dados estatísticos característicos resultantes dos testes experimentais realizados no protótipo, o modelo *MLR* desenvolvido para características estatísticas de simulação mostra um desempenho satisfatório na determinação dos locais de realização dos distúrbios capacitivos representativos das *PDs*, como ilustrado na Figura 6.5. Neste caso, os pontos de ocorrência das perturbações puderam ser adequadamente localizados com até 70% de acertos, como pode ser verificado na Tabela 6.3. Pela mesma tabela, pode-se perceber que o modelo *MLR* apresenta um pior desempenho para os sinais das derivações em 70%, 45% e 20% do enrolamento, principalmente, que estão fisicamente localizadas nas proximidades do topo do mesmo e que o modelo não consegue distinguir. Tal fato ocorre devido à existência de maiores divergências entre as características estatísticas de simulação e experimentais nestas

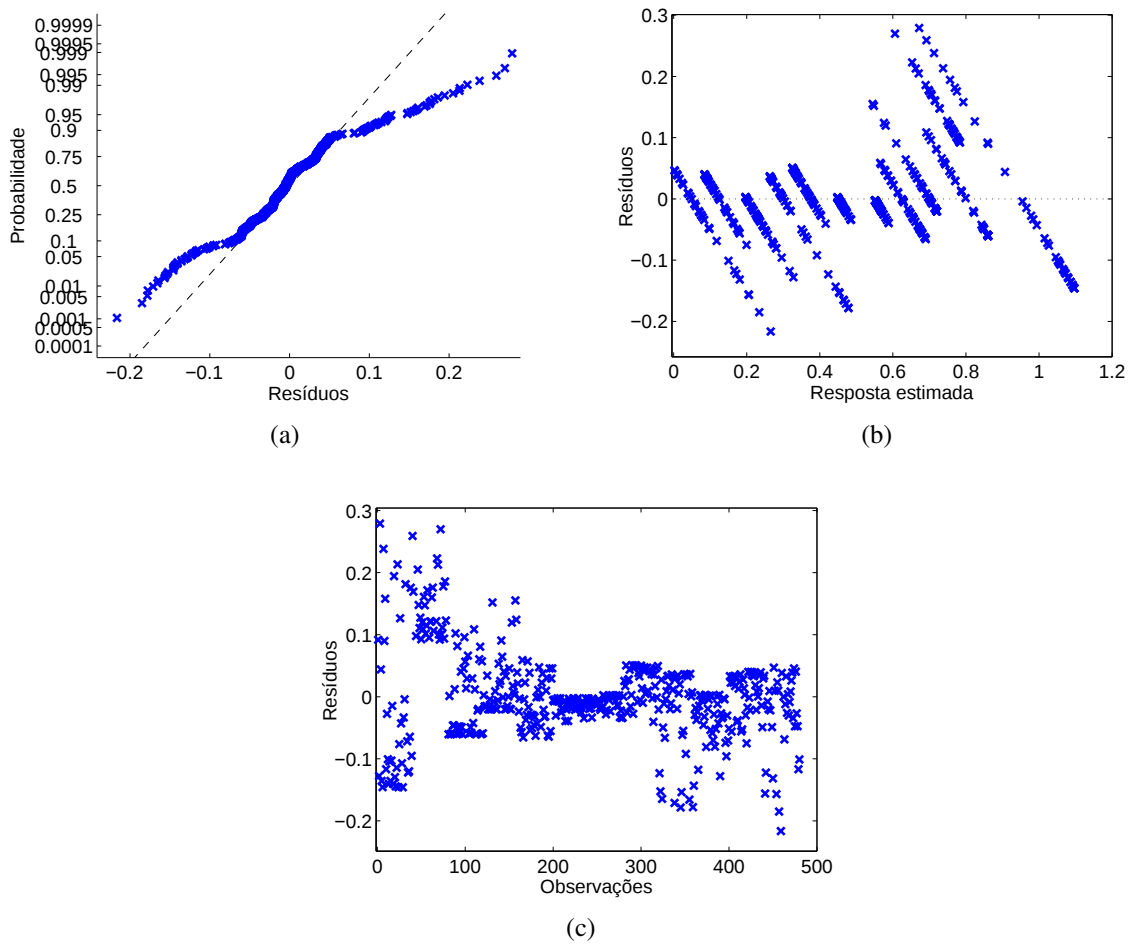


Figura 6.4: Gráficos para análise residual do modelo MLR de características estatísticas para o protótipo: (a) probabilidade normal dos resíduos; (b) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.

regiões do enrolamento, de modo geral, em comparação com as características resultantes das PDs /distúrbios nas outras derivações.

Considerando as variáveis características estatísticas selecionadas pelo método *Stepwise* na etapa de ajuste, pode-se notar que estes regressores realmente propiciam uma separação das distintas classes dos dados experimentais no espaço, isto é, dos diversos pontos de ocorrência dos distúrbios capacitivos com relação aos locais de ocorrência, como pode ser observado na Figura 6.6. Neste ponto, cada combinação de 3 características estatísticas resulta em uma certa distribuição de pontos no espaço $3D$, possibilitando melhores ou piores separações das classes dos sinais. No entanto, a real separação promovida pelo modelo da Equação (6.1)

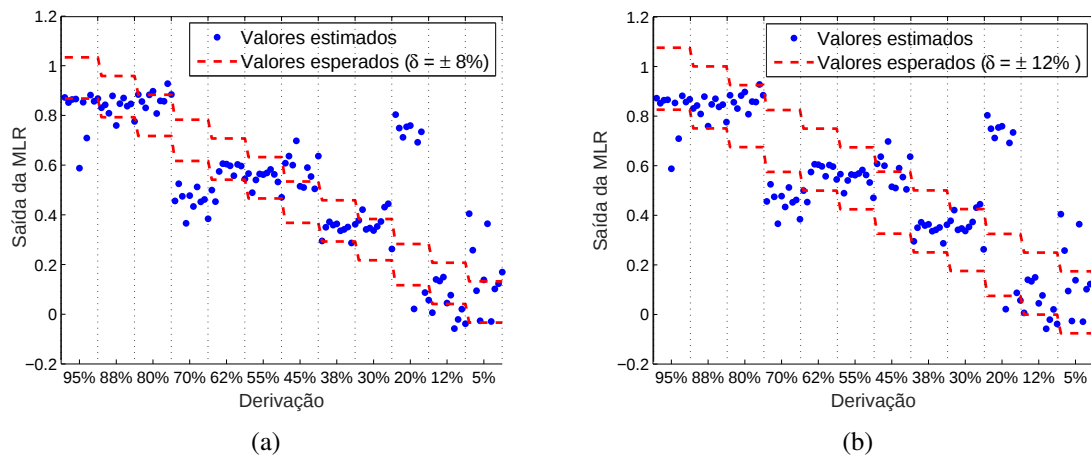


Figura 6.5: Desempenho do modelo *MLR* ajustado para características estatísticas na localização das *PDs* experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12,5\%$.

Tabela 6.3: Percentual de acertos do modelo *MLR* ajustado com características estatísticas na localização das *PDs* experimentais.

Derivação	$\delta = \pm 8\%$	$\delta = \pm 12,5\%$
95%	20%	80%
88%	80%	100%
80%	60%	90%
70%	0%	0%
62%	80%	90%
55%	100%	100%
45%	30%	50%
38%	90%	100%
30%	70%	80%
20%	0%	10%
12%	50%	70%
5%	50%	70%
Total	52,50%	70,00%

deve ser visualizada em 6 dimensões, cuja representação não é factível.

Visando uma comparação de desempenho da técnica *MLR* utilizada neste trabalho com outra estratégia de classificação de sinais, Redes Neurais Artificiais foram também avaliadas, considerando-se o mesmo conjunto de dados empregado na regressão.

A Figura 6.7 e a Tabela 6.4 apresentam o comportamento de uma rede neural com 2 camadas escondidas, cada uma com 10 neurônios e função de ativação linear, na localização das *PDs* experimentais. Esta estrutura *ANN* foi determinada como aquela que apresenta um maior percentual de acertos na validação, quando treinada com os mesmos dados caracterís-

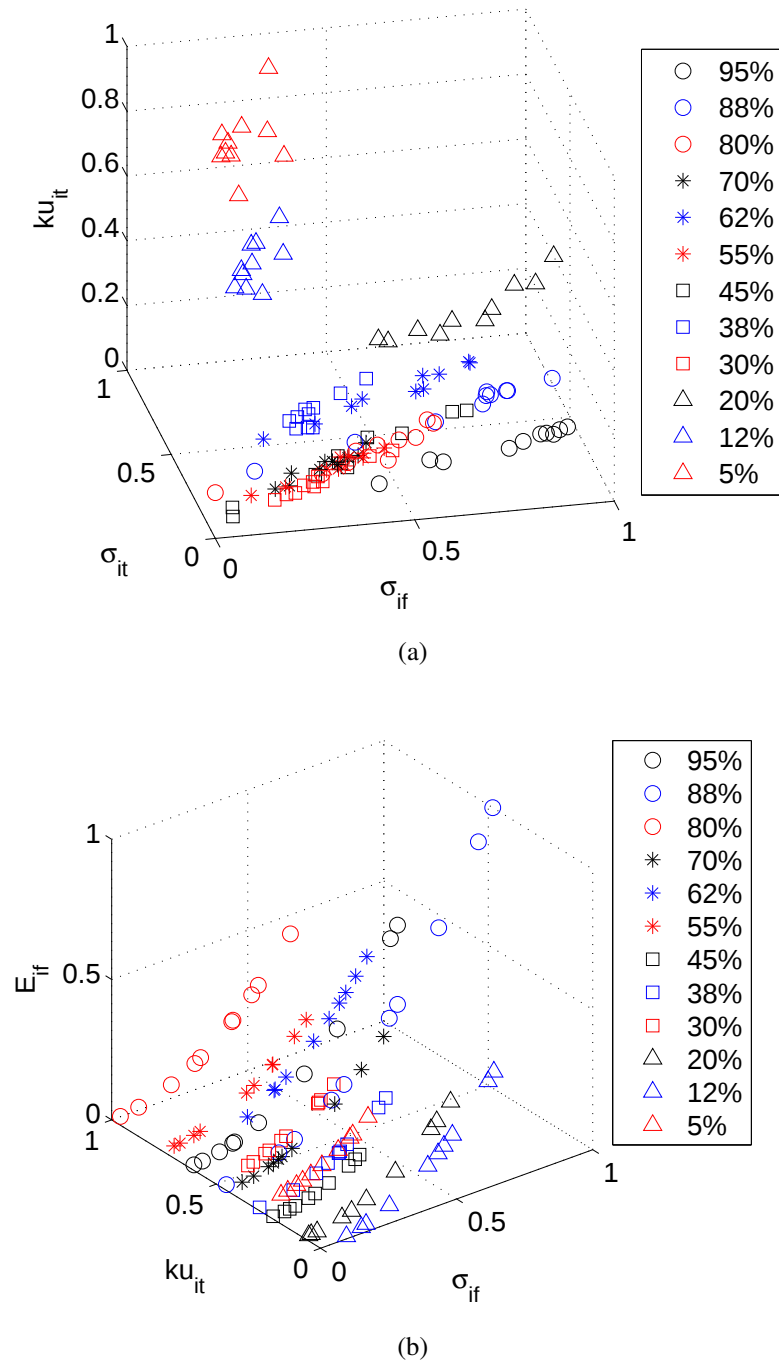


Figura 6.6: Distribuição espacial de pontos característicos estatísticos extraídos dos sinais terminais medidos.

tivos estatísticos empregados no ajuste do modelo MLR da Equação (6.1). Comparando-se o desempenho das técnicas MLR e ANN , pode-se notar que esta última apresenta um desempenho ligeiramente inferior para $\delta = 12,5\%$ e ligeiramente superior para $\delta = 8\%$, e o mesmo

problema na classificação dos distúrbios realizados nas proximidades do topo do protótipo.

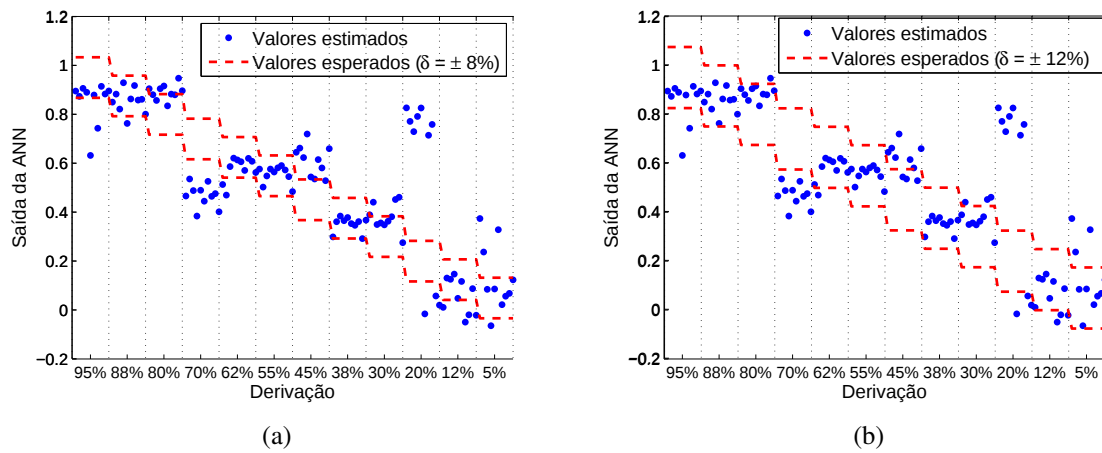


Figura 6.7: Desempenho da *ANN* treinada para características estatísticas na localização das *PDs* experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12,5\%$.

Tabela 6.4: Percentual de acertos da *ANN* treinada com características estatísticas na localização das *PDs* experimentais.

Derivação	$\delta = \pm 8\%$	$\delta = \pm 12,5\%$
95%	80%	80%
88%	90%	100%
80%	50%	90%
70%	0%	0%
62%	80%	90%
55%	100%	100%
45%	10%	30%
38%	90%	100%
30%	60%	70%
20%	0%	0%
12%	60%	70%
5%	60%	70%
Total	56,67%	66,67%

6.2.3 Desempenho para características *PCA*

Assim como verificado para o modelo *MLR* de características estatísticas, o melhor modelo identificado para características *PCA* foi um modelo de 1ª ordem sem interações entre termos, como mostrado na Equação (6.2). Neste caso, apenas a variável PC_{11} foi deconsiderada pelo método *Stepwise* de ajuste.

$$y = 0,32 + 0,44PC_{12} - 0,70PC_{21} + 0,63PC_{22}. \quad (6.2)$$

A análise de variância do modelo da Equação (6.2) é apresentada nas Tabelas 6.5 e 6.6, onde é possível notar que o modelo apresenta um bom ajuste aos dados utilizados em sua obtenção, uma vez que R^2_{adj} se encontra bem próximo de 1 e $RMSE$ próximo de 0, ou devido ao valor de F_0 ser maior que o valor relacionado na tabela da distribuição F , para o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), ou ainda pelo p_{valor} associado ser menor que este nível de significância. Ainda, pode-se perceber que as variáveis mantidas pelo *Stepwise* são estatisticamente significativas para a distinção dos locais de ocorrência das PDs advindas de simulações computacionais, pois o índice t_0 destas variáveis é superior ao valores correspondentes na tabela da distribuição t , ou que seus p -valores associados são menores que o nível de significância.

Tabela 6.5: Análise de variância para o modelo da Equação (6.2).

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	F_0	p_{valor}
Regressão	38,47	3	6657,70	0
Erro	0,92	476		
Total	39,38	479		
$R^2 = 0,977$		$R^2_{adj} = 0,977$		$RMSE = 0,044$

Tabela 6.6: Teste t -estatístico para o modelo da Equação (6.2).

Termo	Coefficiente estimado	t para H0	p_{valor}
<i>constante</i>	0,32	10,59	0
PC_{12}	0,44	17,65	0
PC_{21}	-0,70	-14,81	0
PC_{22}	0,63	21,58	0

Os gráficos para análise residual do modelo MLR da Equação (6.2) são retratados na Figura 6.8. Pode-se constatar que todas as suposições adotadas na modelagem são satisfeitas, uma vez que os pontos se distribuem aproximadamente como uma linha reta em 6.8(a), simetricamente em torno de 0 em 6.8(b) e aleatoriamente em 6.8(c).

Na validação, onde dados característicos de simulação ainda desconhecidos pelo modelo MLR são apresentados ao mesmo, o modelo da Equação (6.2) mostra um considerável de-

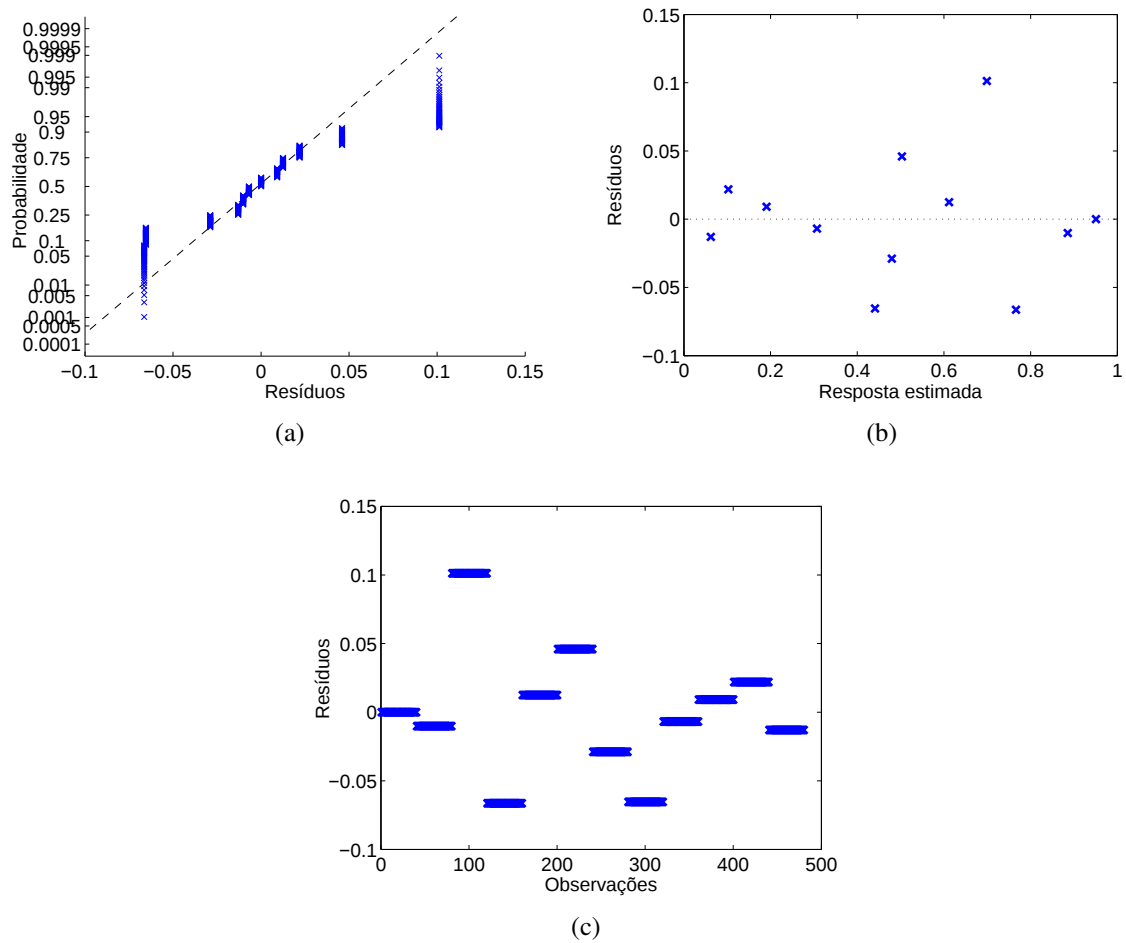


Figura 6.8: Gráficos para análise residual do modelo *MLR* de características *PCA* para o protótipo: (a) probabilidade normal dos resíduos; (b) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.

sempenho na predição dos locais de ocorrência das *PDs*, apresentando percentuais totais de acertos de 75% e 100% para $\delta = \pm 8\%$ e $\delta = \pm 12,5\%$, respectivamente.

No entanto, para características *PCA* resultantes dos testes experimentais realizados no protótipo, o modelo *MLR* demonstra um desempenho insatisfatório na localização dos pontos de ocorrência dos distúrbios capacitivos, como pode ser notado na Figura 6.9 e na Tabela 6.7. De certo modo, um pior desempenho era esperado nesta situação, em comparação ao modelo ajustado para características estatísticas, uma vez que uma pior correspondência variacional pôde ser notada entre as características *PCA* advindas dos sinais de simulação e das medições realizadas (Figura 6.3).

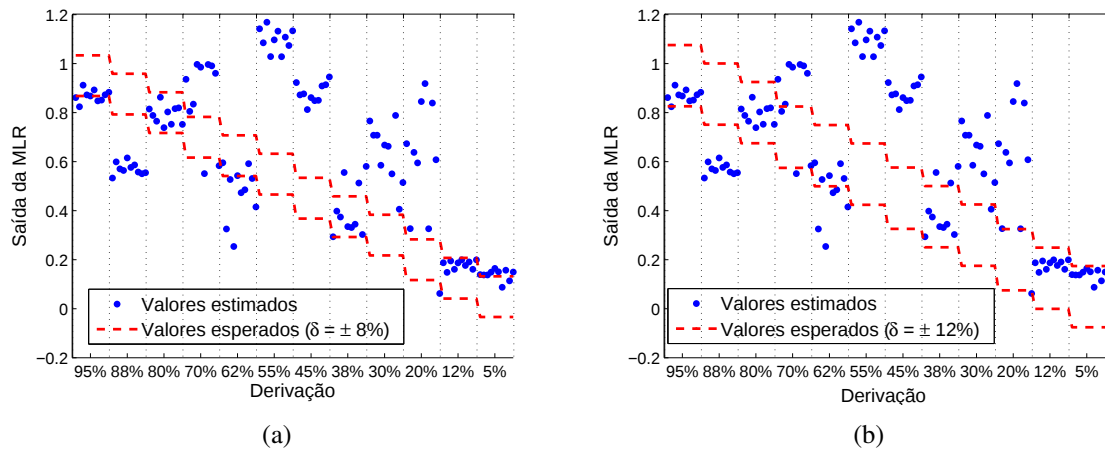


Figura 6.9: Desempenho do modelo *MLR* ajustado para características *PCA* na localização das *PDs* experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12\%$.

Tabela 6.7: Percentual de acertos do modelo *MLR* ajustado com características *PCA* na localização das *PDs* experimentais.

Derivação	$\delta = \pm 8\%$	$\delta = \pm 12\%$
95%	50%	90%
88%	0%	0%
80%	100%	100%
70%	0%	20%
62%	30%	50%
55%	0%	0%
45%	0%	0%
38%	70%	70%
30%	0%	10%
20%	0%	0%
12%	100%	100%
5%	20%	100%
Total	30,83%	45,00%

A Figura 6.10 mostra uma distribuição espacial das classes dos sinais terminais quanto aos locais de realização dos distúrbios capacitivos, para características *PCA*. Pela figura, pode-se visualmente perceber uma certa aglomeração de pontos, fato que justifica o pior desempenho na classificação das características *PCA*, frente às características estatísticas extraídas dos sinais. Neste mesmo sentido, pode-se perceber também que os pontos das derivações em 38%, 12% e 5% se mostram mais destacados no espaço, motivo pelo qual a *MLR* desenvolvida apresenta certa capacidade de localização dos mesmos.

Com relação à localização por *ANNs*, a melhor topologia determinada possui 1 única

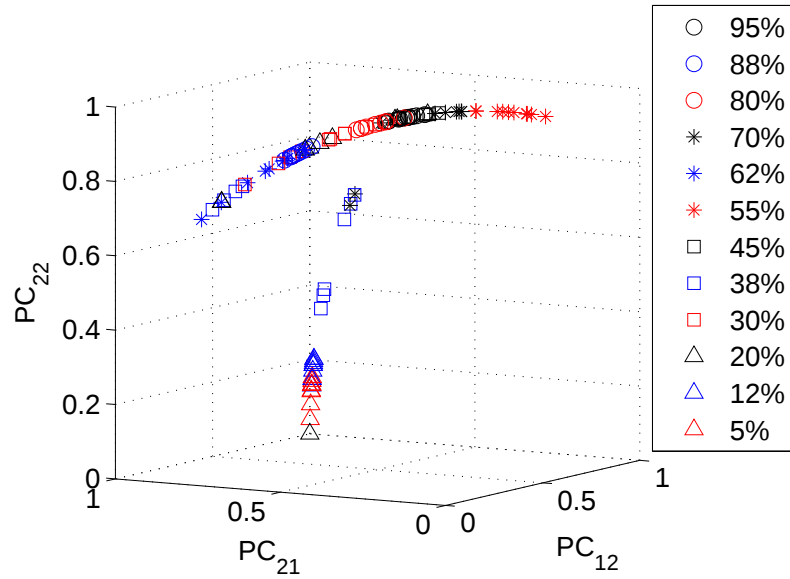


Figura 6.10: Distribuição espacial de pontos característicos *PCA* extraídos dos sinais terminais medidos.

camada escondida, com 5 neurônios e função de ativação tangente sigmóide, a qual possibilita, na validação, uma correta determinação dos locais de ocorrência dos dados *PCA* de simulação. Para os dados provenientes dos sinais experimentais, embora percentuais totais de acertos similares àqueles obtidos para o modelo *MLR* da Equação (6.2) sejam obtidos, o desempenho das duas técnicas se mostra diferente quando analisado para as distintas derivações do protótipo, como pode ser verificado na Figura 6.11 e na Tabela 6.8. Neste sentido, a *ANN* é capaz de determinar corretamente, principalmente, apenas a localização dos distúrbios capacitivos ocorridos nas camadas de borda do enrolamento, enquanto a *MLR* possibilita também a localização para descargas em derivações nas camadas intermediárias. Ainda, pode-se notar que, com exceção dos pontos *PCA* em derivações em 12% e 5%, e alguns poucos em 38%, os quais se mostraram mais separados no gráfico 3D da Figura 6.10, os demais pontos característicos tendem a ser classificados como resultantes de distúrbios nas derivações em 95% e 88% do enrolamento, isto é, na camada externa do mesmo.

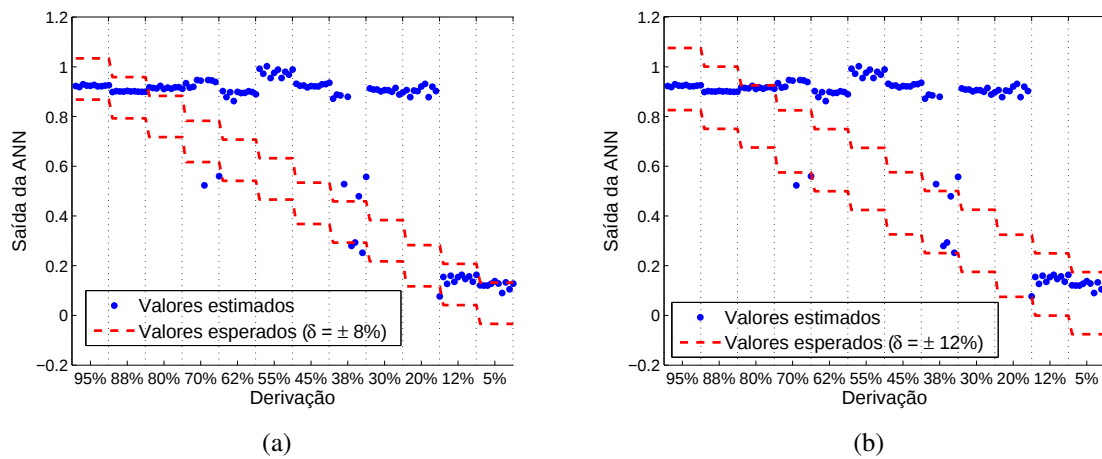


Figura 6.11: Desempenho da *ANN* treinada para características *PCA* na localização das *PDs* experimentais: (a) $\delta = 8\%$; (b) $\delta = 12\%$.

Tabela 6.8: Percentual de acertos da *ANN* treinada com características *PCA* na localização das *PDs* experimentais.

Derivação	$\delta = \pm 8\%$	$\delta = \pm 12\%$
95%	100%	100%
88%	100%	100%
80%	0%	100%
70%	0%	0%
62%	0%	0%
55%	0%	0%
45%	0%	0%
38%	10%	40%
30%	0%	0%
20%	0%	10%
12%	100%	100%
5%	80%	100%
Total	32,50%	45,83%

6.3 Estudos de casos

Com a finalidade de verificar o emprego da metodologia *MLR* para configurações de enrolamentos normalmente empregados nos transformadores de potência, dois estudos de casos foram avaliados neste trabalho: caso *i* - enrolamento *layer-type* com diversas camadas de condutores (quantidade superior ao número de camadas do protótipo anteriormente estudado) e; caso *ii* - enrolamento *disk-type*.

Os enrolamentos analisados foram obtidos de transformadores apresentados na literatura,

a partir de trabalhos que fornecessem as características necessárias para uma estimação dos parâmetros fundamentais para a modelagem e simulação *MTL*.

Para o estudo de caso *i*, foi selecionado o enrolamento *AT* do transformador de distribuição de 15 *kVA* e 6600/69 *V* utilizado em Popov *et al.* (2007), constituído por 15 camadas de condutores com seção reta circular, cada uma com 200 espiras. O isolamento é composto pelo verniz isolante dos condutores e por óleo mineral. Tal enrolamento tem configuração semelhante àquela ilustrada na Figura 3.3 sendo, segundo Popov *et al.* (2007), as principais capacitâncias necessárias para a modelagem *MTL*: capacitâncias entre espiras adjacentes de uma mesma camada (C_e), capacitâncias entre espiras adjacentes de camadas adjacentes (C_c), capacitâncias entre espiras da borda interna e o enrolamento de baixa tensão (C_E) e capacitâncias entre espiras do topo e da base das camadas e o núcleo aterrado (C_T). Embora o enrolamento tratado no estudo de caso *i* seja de um transformador de distribuição, uma configuração do mesmo tipo pode ser empregada em transformadores de potência, com devidas adaptações realidas. A escolha deste enrolamento como estudo de caso se justifica pela disponibilidade das características construtivas do mesmo no artigo consultado.

O caso de estudo *ii* aborda o transformador de potência de 30 *MVA* e 132/20 *kV* exposto em Jafari e Akbari (2007), cujo enrolamento *AT* é composto por 50 discos empilhados, cada um com 14 espiras de seção retangular. O sistema isolante é formado por papel impregnado com óleo entre espiras adjacentes de um mesmo disco, e por estruturas de fixação de papel e óleo entre as demais partes. A Figura 3.2 reflete o transformador de Jafari e Akbari (2007) com as principais capacitâncias recomendadas pelos autores para a modelagem *MTL* do enrolamento *AT*, sendo: C_e as capacitâncias entre espiras adjacentes de um mesmo disco, C_d as capacitâncias entre espiras adjacentes de discos adjacentes e C_E as capacitâncias entre as espiras das bordas e os enrolamentos de baixa tensão (*BT*) e de regulação (*RT*).

Aplicando as equações propostas nos respectivos trabalhos de Popov *et al.* (2007) e Jafari e Akbari (2007) para cálculo das capacitâncias, principalmente as clássicas equações do capacitor de placas paralelas e do capacitor cilíndrico, assim como as dimensões e caracterís-

ticas dos enrolamentos fornecidas nestes trabalhos, os valores mostrados na Tabela 6.9 foram estimados. Com estes valores e conhecendo-se a disposição das espiras nos enrolamentos, as matrizes $\mathbf{C}$ dos estudos de caso i e ii para a modelagem MTL podem ser constituídas.

Tabela 6.9: Valores estimados para as capacitâncias dos enrolamentos dos estudos de casos.

Capacitância	Caso i	Caso ii
C_e	152,37 pF	1962,17 pF
C_c	59,29 pF	—
C_d	—	147,95 pF
$C_{E(BT)}$	2,03 pF	39,02 pF
$C_{E(RT)}$	—	55,71 pF
C_t	0,50 pF	—

As matrizes $\mathbf{L}$ e $\mathbf{G}$ podem ser aproximadas diretamente das matrizes $\mathbf{C}$, considerando os sistemas isolantes dos enrolamentos como homogêneos, como realizado nos supracitados trabalhos de Popov *et al.* (2007) e Jafari e Akbari (2007). Para o cálculo das resistências e constiuição da matriz $\mathbf{R}$, a clássica equação das resistências de condutores, considerando o efeito pelicular, pode ser empregada. Deste modo, $R \sim 38,37\sqrt{f} \mu\Omega$ para o caso i e $R \sim 45,54\sqrt{f} \mu\Omega$ para o caso ii .

As simulações MTL foram realizadas agrupando-se 10 espiras. As PDs foram representadas como duplas exponencias, como realizado para o caso do protótipo, com quantidades de carga aleatórias entre $\pm 5000 pC$ e tempo de subida de 50 ns , sendo injetadas em 10 pontos ao longo dos enrolamentos, em 95%, 85%, 75%, 65%, 55%, 45%, 35%, 25%, 15% e 5% do total de espiras. De modo a constituir um conjunto de dados, um total de 50 simulações foram realizadas para cada ponto considerado.

As Figuras 6.12(a) e 6.12(b) mostram os sinais terminais obtidos pela MTL para PDs de aproximadamente +5000 pC ocorridas em 55% dos enrolamentos dos casos de estudo i e ii , respectivamente, onde pode-se notar que diferentes formas de onda resultam das descargas nas diferentes configurações de enrolamentos, com diferentes características oscilatórias e amplitudes.

Assim como verificado para o caso do protótipo, quando características estatísticas, em

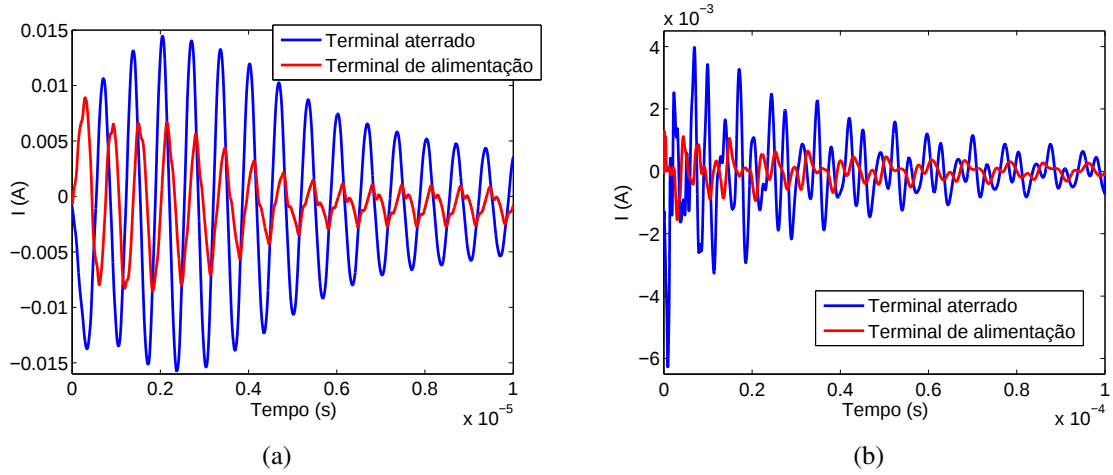


Figura 6.12: Sinais terminais simulados para PD em 55% do enrolamento: (a) Caso i ; (b) Caso ii .

conjunto com a energia e a carga aparante, são extraídas dos sinais terminais, padrões variacionais podem ser obtidos, com relação aos locais de ocorrência das PD s, como ilustrado na Figura 6.13. Nesta situação, diferenças podem ser notadas com relação ao tipo de enrolamento. Por exemplo, para as características σ_{if} e E_{if} (Figuras 6.13(a) e 6.13(c), respectivamente), comportamentos diretamente decrescentes podem ser notados para o estudo de caso i , caminhando do ponto em 95% para 5% do enrolamento, enquanto que para o estudo de caso ii , um formato de “chapéu” pode ser observado para os pontos nas proximidades de 25% do enrolamento. Para a característica sk_{if} (Figura 6.13(b)) comportamento variacional oposto parece ocorrer para os dados dos estudos de casos i e ii . Estas diferenças nos padrões variacionais entre os casos i e ii ocorrem para as demais características estatísticas extraídas dos sinais terminais, assim como pode ser notada também comparando-se as características extraídas com o caso do protótipo (Figura 6.2).

A Figura 6.14 mostra as características PCA extraídas dos sinais de simulação MTL para os estudos de caso i e ii , onde pode-se notar, também, certas diferenças nos padrões variacionais resultantes.

Uma vez que os modelos MLR (e as redes ANN) são obtidos neste trabalho a partir das características extraídas dos sinais terminais dos enrolamentos, por meio da simulação MTL

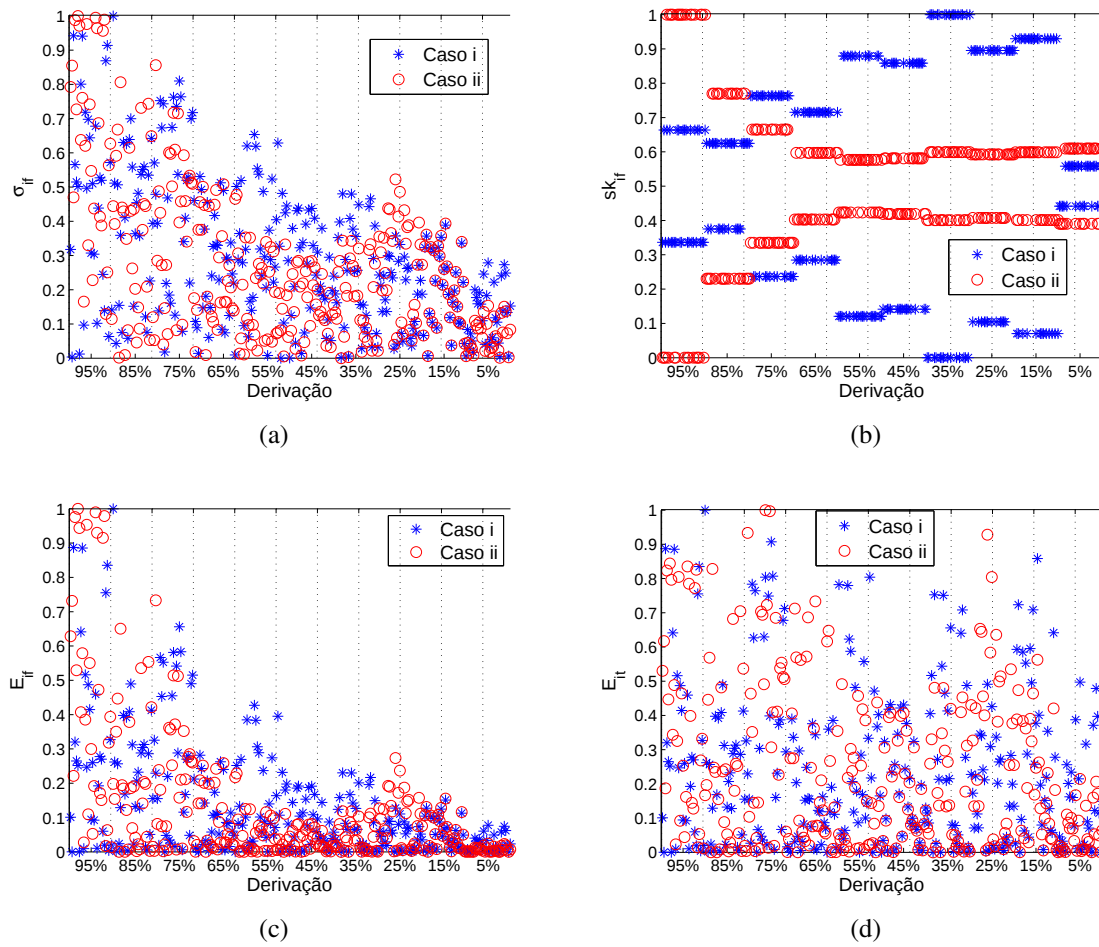


Figura 6.13: Características estatísticas extraídas dos sinais terminais simulados e medidos:
 (a) σ_{it} ; (b) sk_{if} ; (c) E_{if} ; e (d) E_{it} .

dos mesmos considerando-se *PDs* em sua extensão, tem-se que, uma vez que diferentes configurações de enrolamentos propiciam a obtenção de diferentes padrões variacionais para as variáveis características extraídas, com relação aos pontos de ocorrência das *PDs*, diferentes estruturas *MLR* (ou *ANNs*) podem ser necessárias para a determinação dos locais de ocorrência destas descargas, propiciando um pior ou melhor desempenho neste propósito.

A seguir, é analisada a aplicabilidade da *MLR* na localização das *PDs* para os enrolamentos dos estudos de casos *i* e *ii*, desenvolvida conforme procedimento discutido na Seção 5.6. Uma vez que apenas dados de simulação foram gerados para estes casos, após o ajuste, apenas o desempenho na validação dos modelos foi avaliado, momento em que dados característicos ainda desconhecidos foram apresentados. Neste sentido, para avaliação do percentual

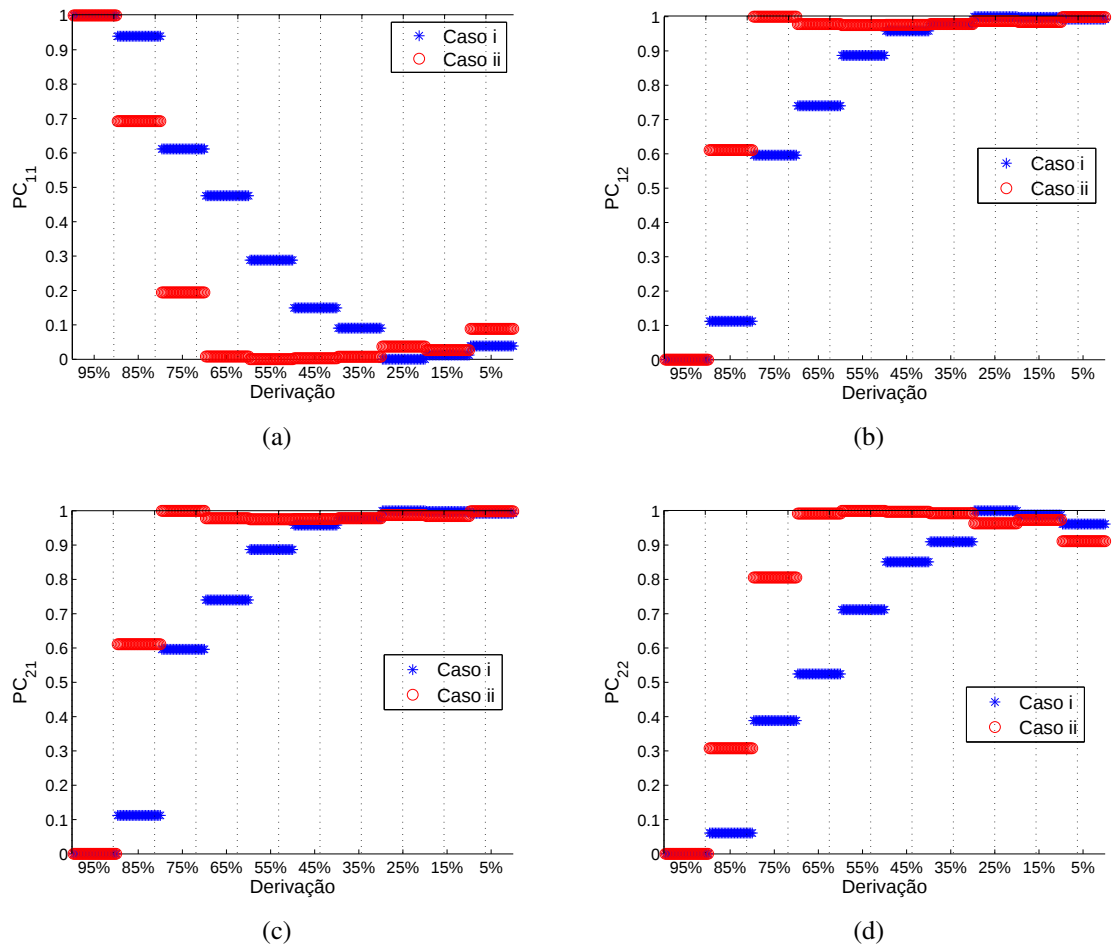


Figura 6.14: Características *PCA* extraídas dos sinais terminais simulados e medidos: (a) PC_{11} ; (b) PC_{12} ; (c) PC_{21} ; e (d) PC_{22} .

de acertos foi admitido um patamar de erro de $\pm 0,05$, correspondente a um desvio de $\pm 5\%$ ao longo dos enrolamentos. Vale ressaltar que, embora o percentual de acertos na validação forneça um indicativo da capacidade dos modelos na determinação dos locais de ocorrência das *PDs*, para dados reais, um menor desempenho deve ser esperado, conforme verificado no caso no protótipo.

6.3.1 Desempenho para características estatísticas

Dentre os 4 modelos ajustados pelo método *stepwise*, a partir de um modelo de 1ª ordem contendo todas as variáveis características estatísticas, os melhores modelos para a locali-

zação das *PDs* foram identificados como um modelo de 1^a ordem com interações, para o enrolamento *layer-type* do caso *i*, e como um modelo de 2^a ordem para o enrolamento *disk-type* do caso *ii*, mostrados nas Equações (6.3) e (6.4), respectivamente. No processo de ajuste, para ambos os casos, apenas a variável média (μ) dos sinais terminais não foi considerada na modelagem pelo método *Stepwise*, sendo assim a única variável característica estatística insignificante para a localização das *PDs*. Para o caso do protótipo, tal variável também não foi incorporada no modelo *MLR* desenvolvido (Equação (6.1)).

$$\begin{aligned}
 y = & 16,50 - 4,44x10^{-5}\mu_{it} + 42,43\sigma_{if} - 17,14\sigma_{it} - 11,27sk_{if} - 21,10sk_{it} + 3,32ku_{if} \\
 & + 4,20ku_{it} - 19,57E_{if} + 22,71E_{it} - 54,34Qap_{if} + 4,48x10^5Qap_{it} - 36,69\mu_{it}Qap_{it} - 52,49\sigma_{if}\sigma_{it} \\
 & - 20,34\sigma_{if}sk_{it} - 11,57\sigma_{if}ku_{it} + 14,91\sigma_{if}E_{if} + 20,89\sigma_{if}E_{it} - 13,25\sigma_{if}Qap_{it} - 1,13\sigma_{it}sk_{if} \\
 & + 7,32\sigma_{it}sk_{it} - 5,76\sigma_{it}ku_{if} + 10,66\sigma_{it}sk_{it} - 28,99\sigma_{it}E_{if} - 4,86\sigma_{it}E_{it} + 5,49\sigma_{it}Qap_{if} \\
 & + 5,10\sigma_{it}Qap_{it} - 6,41sk_{if}sk_{it} - 0,15sk_{if}ku_{if} - 0,15sk_{if}ku_{it} + 16,62sk_{if}E_{if} - 1,20sk_{if}E_{it} \\
 & + 15,61sk_{if}Qap_{if} + 13,14sk_{if}Qap_{it} + 0,23sk_{it}ku_{if} + 0,08sk_{it}ku_{it} + 11,85sk_{it}E_{if} - 2,06sk_{it}E_{it} \\
 & + 55,33sk_{it}Qap_{if} - 8,77sk_{it}Qap_{it} - 4,06ku_{if}ku_{it} + 13,09ku_{if}E_{if} - 3,65ku_{if}E_{it} - 0,97ku_{if}Qap_{if} \\
 & - 4,69ku_{if}Qap_{it} - 19,84ku_{it}E_{if} + 15,71ku_{it}E_{it} - 4,90ku_{it}Qap_{it} - 0,86E_{if}E_{it} + 16,29E_{if}Qap_{it} \\
 & + 9,87E_{it}Qap_{if} - 1,62E_{it}Qap_{it} - 102,53Qap_{if}Qap_{it},
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

$$\begin{aligned}
 y = & 150,76 + 7,16\sigma_{if} - 3,95\sigma_{it} + 36,13sk_{if} - 459,67sk_{it} + 5,01ku_{if} + 3,91ku_{it} \\
 & - 26,68E_{if} + 22,13E_{it} - 213,38Qap_{if} + 33,65Qap_{it} - 14,72\sigma_{if}\sigma_{it} + 2,75\sigma_{if}ku_{if} - 217,45\sigma_{if}ku_{it} \\
 & - 27,14\sigma_{if}E_{if} - 28,06\sigma_{if}E_{it} + 2,13\sigma_{it}ku_{if} + 169,92\sigma_{it}ku_{it} + 51,54\sigma_{it}E_{if} + 4,24\sigma_{it}E_{it} \\
 & + 8,66sk_{if}sk_{it} + 0,03sk_{if}ku_{if} + 0,96sk_{if}ku_{it} - 47,63sk_{if}Qap_{if} - 20,71sk_{if}Qap_{it} - 0,12sk_{it}ku_{it} \\
 & - 172,63sk_{it}Qap_{it} - 70,53ku_{if}ku_{it} - 5,84ku_{if}E_{if} + 3,65ku_{if}E_{it} - 298,03ku_{it}E_{if} + 20,41ku_{it}E_{it} \\
 & - 4,19E_{if}E_{it} + 118,97Qap_{if}Qap_{it} - 6,28sk_{if}^2 + 542,40sk_{it}^2 - 2,62ku_{if}^2 - 131,93ku_{it}^2 + 2,68E_{if}^2 \\
 & + 1,23E_{it}^2 + 177,60Qap_{if}^2 + 3,65Qap_{it}^2.
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Comparando-se as equações *MLR* desenvolvidas para os casos *i* e *ii* com àquela desenvolvida para o caso do protótipo de enrolamento deste trabalho, observa-se que esta última se mostra de menor complexidade, isto é, apresenta menor ordem e menor número de termos. A princípio, tal fato parece estar relacionado às complexidades estruturais dos enrolamentos considerados. Contudo, análises mais cuidadosas precisam ser realizadas.

As Tabelas 6.10 e 6.11 mostram a *ANOVA* dos modelos *MLR* das Equações (6.3) e (6.4), respectivamente, onde pode-se notar que ambos os modelos apresentam um bom ajuste aos dados característicos estatísticos utilizados em sua obtenção. Ainda, é possível perceber, estatisticamente, que os termos não-lineares, isto é, as interações entre termos do modelo *MLR* do caso *i* e os termos quadráticos do caso *ii*, incorporados pelo método *Stepwise* na etapa de ajuste, são significativos, uma vez que os valores obtidos no teste *F* destes conteúdos são superiores aos valores relacionados na tabela da distribuição *F*, ou que seus *p*-valores associados são inferiores ao nível de significância de 5%.

Tabela 6.10: Análise de variância para o modelo da Equação (6.3).

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	F_0	p_{valor}
Regressão	24,15	52	4157,40	0
linear	21,74	11	17695,00	0
não-linear	2,41	41	525,36	0
Erro	0,027	240		
Total	24,17	292		
$R^2 = 0,999$		$R^2_{adj} = 0,999$		$RMSE = 0,011$

Tabela 6.11: Análise de variância para o modelo da Equação (6.4).

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	F_0	p_{valor}
Regressão	24,41	41	18202,00	0
linear	18,78	10	57337,00	0
não-linear	5,66	31	5578,10	0
Erro	$8,25 \times 10^{-3}$	252		
Total	24,45	293		
$R^2 = 1$		$R^2_{adj} = 1$		$RMSE = 0,0006$

Os gráficos para análise residual dos modelos *MLR* desenvolvidos para características estatísticas dos estudos de caso *i* e *ii* são mostrados nas Figuras 6.15 e 6.16, respectivamente.

Pelas figuras, aparentemente, nenhuma violação das premissas adotadas na modelagem parece ocorrer, uma vez que os pontos se distribuem aproximadamente como uma linha reta no gráfico de probabilidade (Figuras 6.15(a) e 6.16(a)), de maneira simétrica em torno da origem no gráfico pela resposta estimada (Figuras 6.15(b) e 6.16(b)) e de maneira aleatória do gráfico dos resíduos ordenados (Figuras 6.15(c) e 6.16(c)).

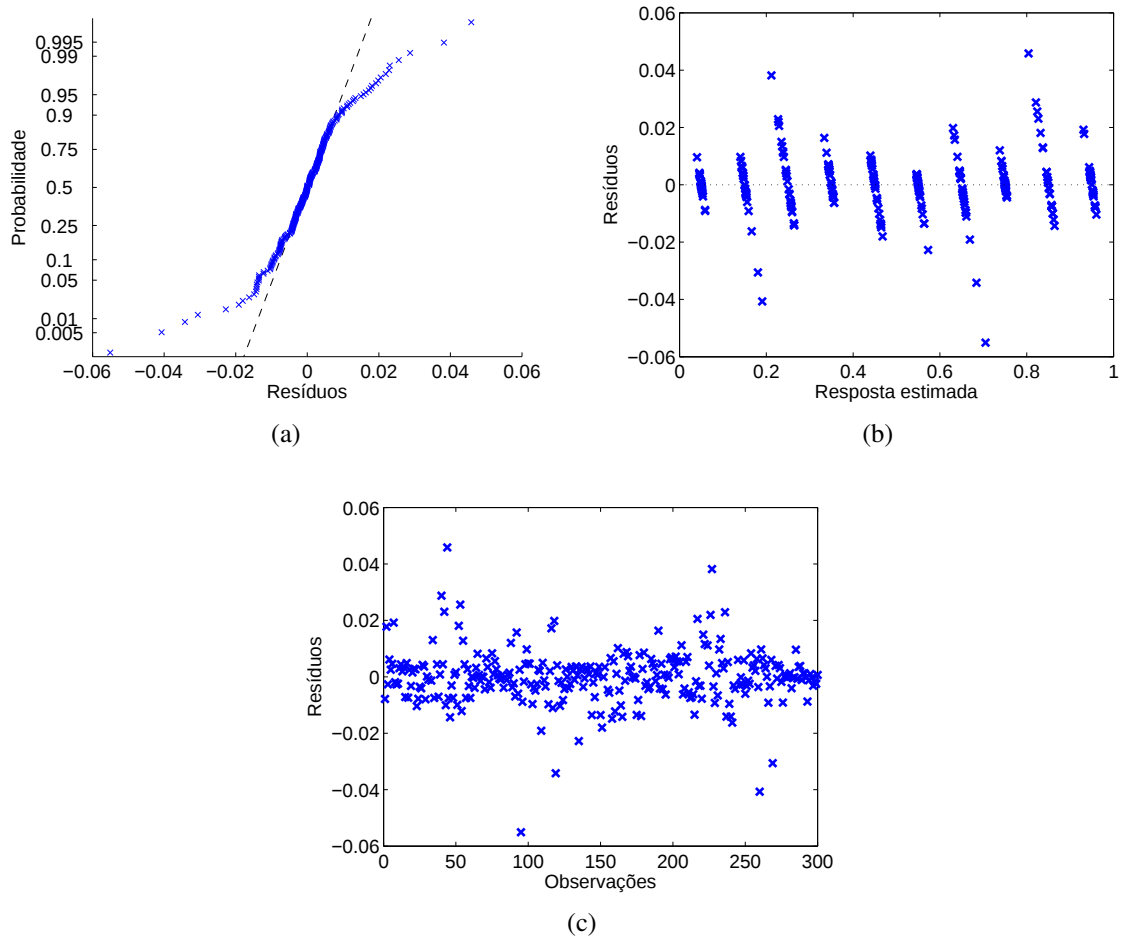


Figura 6.15: Gráficos para análise residual do modelo MLR de características estatísticas do estudo de caso i : (a) probabilidade normal dos resíduos; (a) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.

Nas Figuras 6.17(a) e 6.17(b) são mostrados os desempenhos dos modelos MLR dos casos i e ii , respectivamente, na classificação de dados estatísticos característicos ainda desconhecidos pelos mesmos, isto é, dados separados para a validação. Uma vez que a grande maioria dos pontos estimados para as localizações das PDs se encontram no interior das

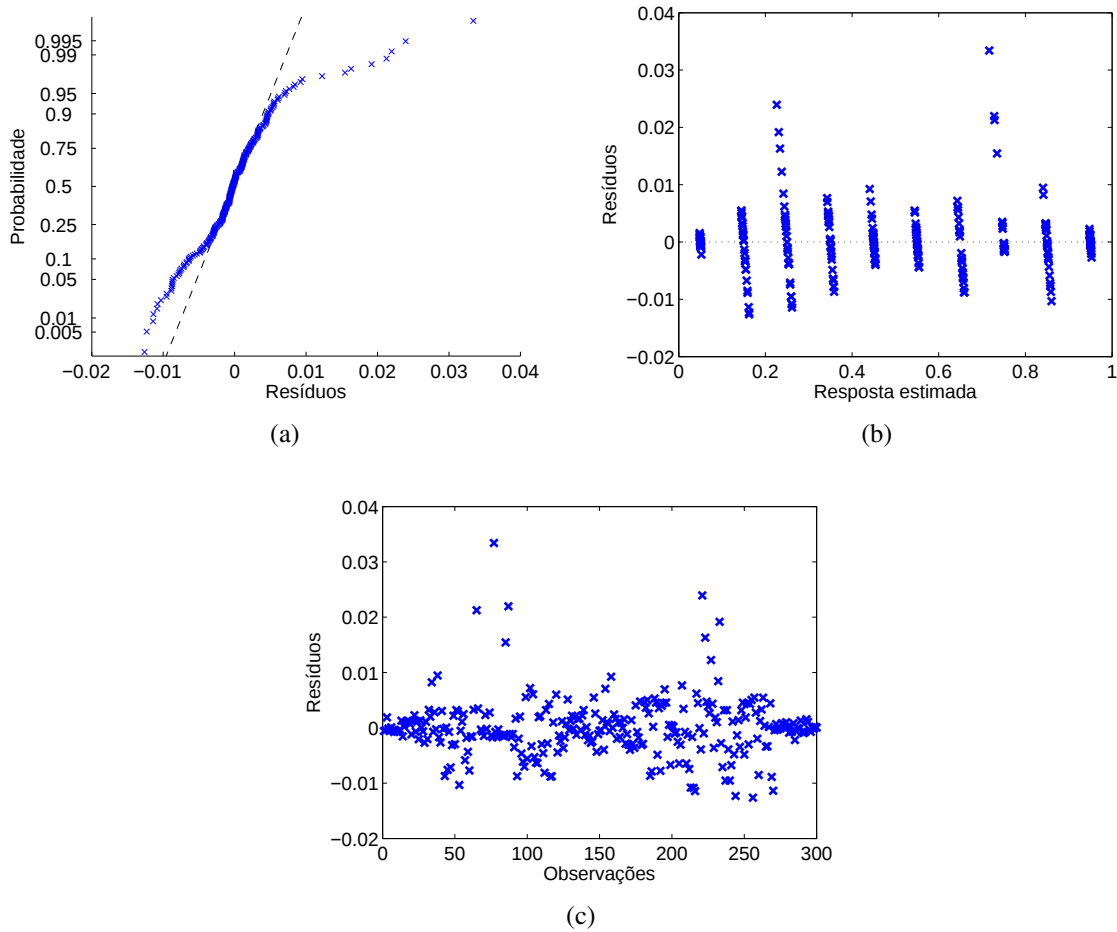


Figura 6.16: Gráficos para análise residual do modelo *MLR* de características estatísticas do estudo de caso *ii*: (a) probabilidade normal dos resíduos; (a) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.

faixas esperadas, constituídas pelo patamar de erro de $\pm 5\%$ admitido para os estudos de casos, certifica-se que os modelos *MLR* para características estatísticas apresentam uma boa capacidade de predição, tanto para enrolamentos *layer-type*, cujo modelo classificou corretamente 96,5% dos dados característicos de validação, quanto para enrolamentos *disk-type*, com modelo apresentando 100% de acertos na validação.

Para cada ponto de injeção das *PDs*, os percentuais de acertos dos modelos *MLR* para características estatísticas são apresentados na Tabela 6.12, assim como uma comparação de desempenho destes modelos com redes neurais, desenvolvidas com os mesmos dados estatísticos característicos empregados nas regressões *MLR*. Para o caso *i*, a melhor *ANN* foi

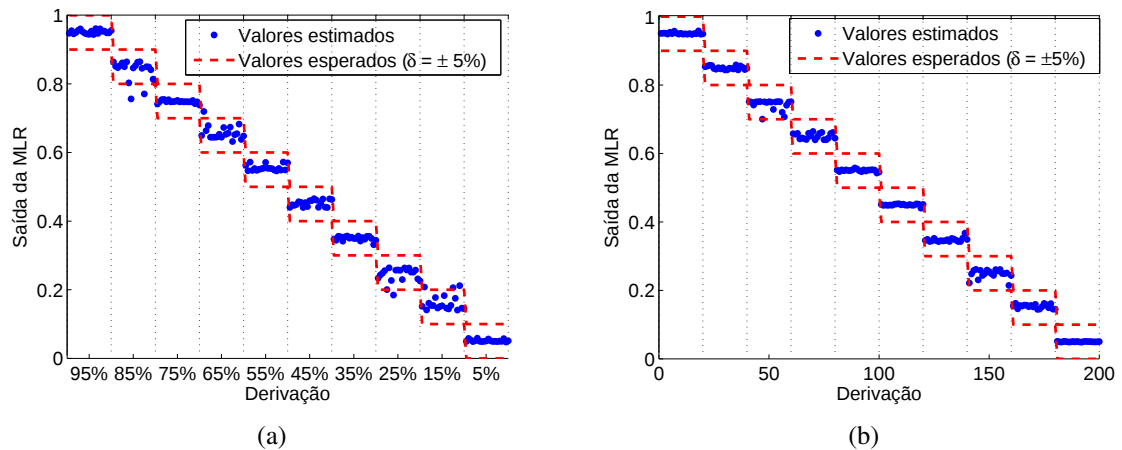


Figura 6.17: Desempenho dos modelos *MLR* de características estatísticas na validação dos estudos de casos: (a) caso *i*; (b) caso *ii*.

identificada como uma rede com 1 camada escondida de 5 neurônios e função de ativação logaritmo sigmóide, capaz de localizar corretamente 92,5% dos dados de validação. Para o caso *ii*, a melhor *ANN* obtida possui 2 camadas escondidas, cada uma com 10 neurônios e função de ativação tangente sigmóide, que apresenta 93% de acertos na validação. Para ambos os casos, pode-se notar que as redes neurais tiveram desempenho pouco inferior aos modelos de regressão.

Tabela 6.12: Percentual de acertos para características estatísticas nos estudos de casos.

Ponto de injeção da <i>PD</i>	Caso <i>i</i>		Caso <i>ii</i>	
	MLR	ANN	MLR	ANN
95%	100%	100%	100%	100%
85%	90%	100%	100%	100%
75%	100%	100%	100%	100%
65%	95%	100%	100%	100%
55%	100%	60%	100%	90%
45%	100%	100%	100%	100%
35%	100%	65%	100%	100%
25%	95%	100%	100%	80%
15%	85%	100%	100%	60%
5%	100%	100%	100%	100%
Total	96.5%	92.5%	100%	93%

6.3.2 Desempenho para características *PCA*

As Equações (6.5) e (6.6) apresentam os melhores modelos obtidos utilizando-se as características *PCA* dos sinais terminais dos estudos de caso *i* e *ii*, nesta ordem. Para ambos os casos, modelos de segunda ordem representaram a melhor estrutura, sendo apenas as variáveis PC_{21} e PC_{22} mantidas na regressão *Stepwise*.

$$y = 0,94 - 25,68PC_{21} + 47,24PC_{22} + 22,85PC_{22}^2, \quad (6.5)$$

$$y = 0,95 - 813,33PC_{21} + 2030,95PC_{22} - 112,67PC_{22}PC_{21} - 1128,26PC_{22}^2. \quad (6.6)$$

A *ANOVA* dos modelos *MLR* obtidos para características *PCA* é mostrada nas Tabelas 6.13 e 6.14, para os estudos de caso *i* e *ii*, respectivamente, onde pode-se notar que os modelos são adequadamente ajustados aos dados característicos utilizados. Também, pode-se perceber que os termos não-lineares presentes são estatisticamente significativos.

Tabela 6.13: Análise de variância para o modelo da Equação (6.5).

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	F_0	p_{valor}
Regressão	23,35	3	1649,10	0
linear	23,06	2	2442,40	0
não-linear	0,29	1	62,66	$4,97 \times 10^{-14}$
Erro	1,40	296		
Total	24,75	299		
$R^2 = 0,944$		$R_{adj}^2 = 0,943$	$RMSE = 0,069$	

Tabela 6.14: Análise de variância para o modelo da Equação (6.6).

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	F_0	p_{valor}
Regressão	22,57	4	763,42	0
linear	12,74	2	862,22	0
não-linear	9,82	2	664,61	0
Erro	2,18	295		
Total	24,75	299		
$R^2 = 0,912$		$R_{adj}^2 = 0,911$	$RMSE = 0,086$	

Aparentemente, nenhum desvio sério das suposições de modelagem ocorrem para os modelos *MLR* das Equações (6.5) e (6.6), como pode ser visualmente identificado nas Figuras

6.18 e 6.19, respectivamente.

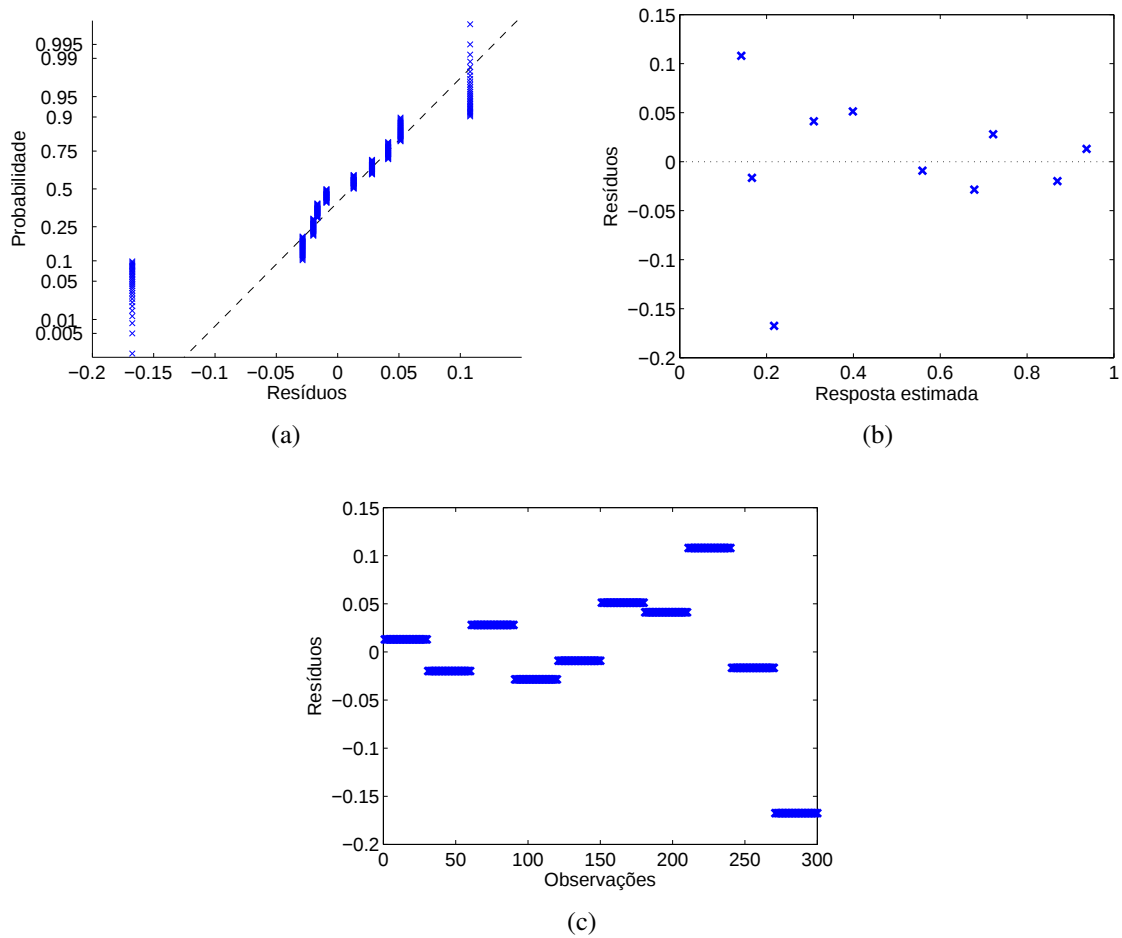


Figura 6.18: Gráficos para análise residual do modelo MLR de características PCA do estudo de caso i : (a) probabilidade normal dos resíduos; (a) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.

Embora os modelos MLR para características PCA tenham apresentados parâmetros estatísticos satisfatórios, para ambos os casos de estudo, os mesmos têm desempenho inferior na validação, em comparação aos modelos de características estatísticas, como pode ser notado nas Figuras 6.20(a) e 6.20(b) e na Tabela 6.15. Neste ponto, inferiores percentuais de acertos foram obtidos, comparando-se com o desempenho obtido para características estatísticas, assim como verificado para o caso do protótipo.

As melhores $ANNs$ obtidas com as variáveis PCA têm configurações similares às aquelas obtidas para características estatísticas, com uma rede de 1 camada escondida de 5 neurônios e

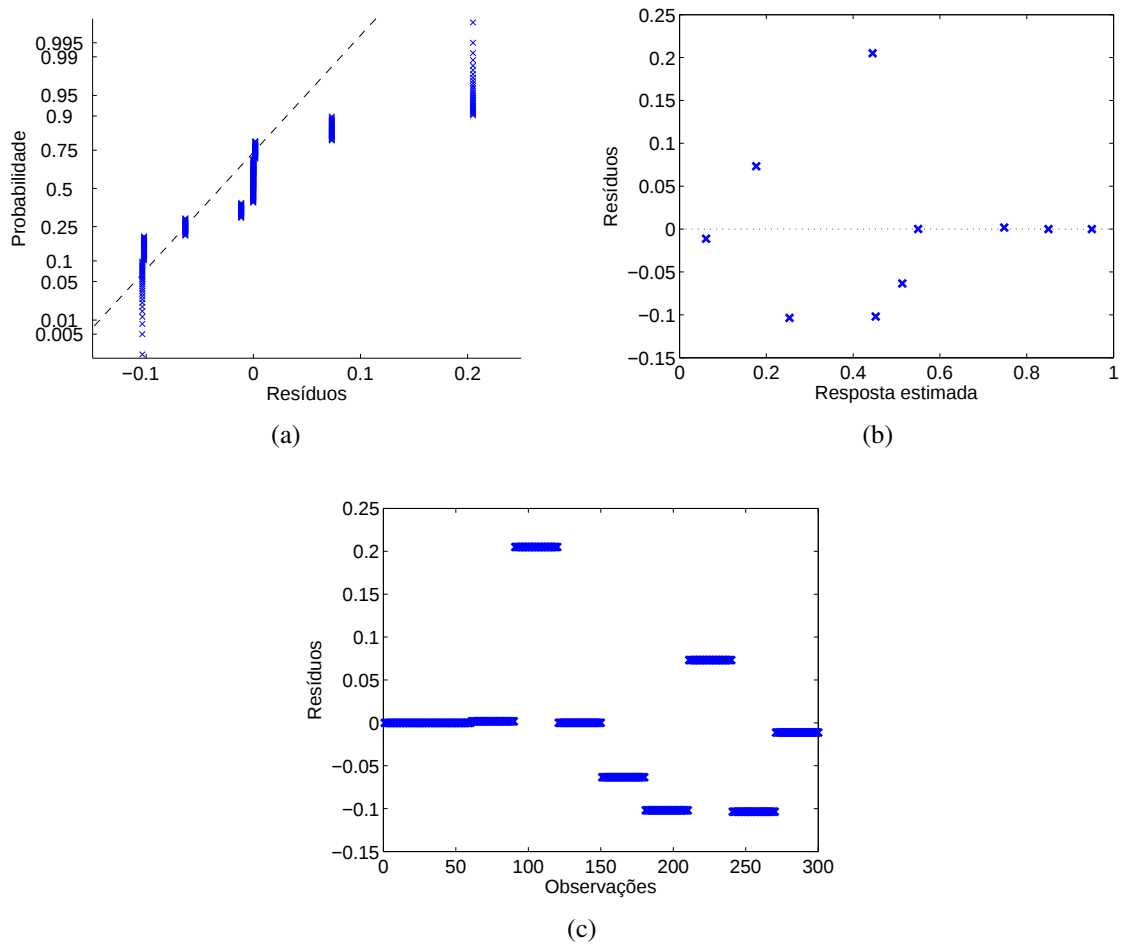


Figura 6.19: Gráficos para análise residual do modelo MLR de características PCA do estudo de caso ii : (a) probabilidade normal dos resíduos; (b) resíduos pela resposta estimada; e (c) resíduos pela ordem de coleta dos dados.

função logaritmo sigmóide para o caso i , e uma rede de 2 camadas escondidas de 10 neurônios e função tangente sigmóide para o caso ii . Em comparação com estas redes, treinadas com os mesmos dados PCA utilizados nas regressões dos modelos (6.5) e (6.6), a técnica MLR apresentam desempenho inferior, como mostrado na Tabela 6.15.

6.4 Considerações do Capítulo

O presente Capítulo mostrou os principais resultados obtidos na localização das PDs em enrolamentos de transformadores, via modelos MLR , e $ANNs$, desenvolvidos por meio

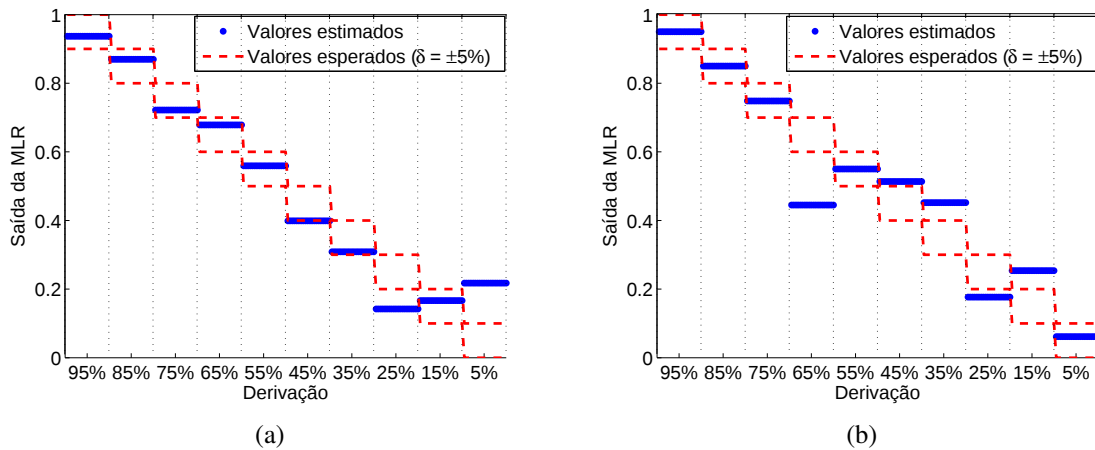


Figura 6.20: Desempenho dos modelos *MLR* de características *PCA* na validação dos estudos de casos: (a) caso *i*; (b) caso *ii*.

Tabela 6.15: Percentual de acertos para características *PCA* nos estudos de casos.

Ponto de injeção da <i>PD</i>	Caso <i>i</i>		Caso <i>ii</i>	
	MLR	ANN	MLR	ANN
95%	100%	100%	100%	100%
85%	100%	100%	100%	100%
75%	100%	100%	100%	100%
65%	100%	100%	0%	0%
55%	100%	100%	100%	100%
45%	0%	100%	0%	100%
35%	100%	0%	0%	0%
25%	0%	100%	0%	100%
15%	100%	0%	0%	100%
5%	0%	100%	100%	100%
Total	70%	80%	50%	80%

de características estatísticas e *PCA* de sinais de corrente de alta frequência obtidos nas extremidades dos enrolamentos.

Foi mostrado que os modelos *MLR* podem ser ajustados a partir de sinais de simulações computacionais pela *MTL* e aplicados satisfatoriamente na localização de pulsos de descargas reais, representadas por meio de distúrbios capacitivos em derivações no protótipo de um enrolamento *layer-type*. Outrossim, estudos de casos, apontaram a aplicabilidade da *MLR* em configurações de enrolamentos de transformadores de potência reais, tanto *layer-*

type quanto *disk-type*.

Para todos os casos analisados, as características estatísticas, em conjunto com a energia e a carga aparente dos sinais terminais, mostraram um melhor desempenho na localização das *PDs* que as características *PCA*. Em comparação com a técnica *ANN*, a estratégia de localização *MLR* investigada neste trabalho apresentou um desempenho equivalente, de modo geral, se mostrando como uma alternativa para a localização das *PDs* nos enrolamentos de transformadores de potência. Contudo, deve-se ressaltar que, uma vez que a *MLR* constitui meras equações polinomiais, tal metodologia pode ser mais facilmente aplicada no monitoramento das *PDs*.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

7.1 Introdução

Neste Capítulo serão ressaltadas as principais conclusões e contribuições da tese. Então, serão apresentadas algumas propostas de continuidade do trabalho, advindas de avaliações ainda não conduzidas. Por fim, é destacada a produção bibliográfica durante o doutoramento.

7.2 Discussões

O presente documento propõe uma metodologia para a localização de regiões deterioradas do isolamento sólido de transformadores de potência, baseada na captação de pulsos de corrente de alta frequência, resultantes de descargas parciais (*PDs*), nas extremidades de alimentação e de aterramento dos enrolamentos por meio de *HFCTs*.

A motivação para a escolha do tema estudado veio da constatação de que a degradação do sistema sólido isolante está diretamente relacionada com a ocorrência de falhas nos enrolamentos dos transformadores de potência, principal tipo de falha que acomete estes equipamentos e que está intimamente ligada com final da vida útil dos mesmos. Assim, por meio da identificação e localização das *PDs*, fenômeno precursor da falha de isola-

mento/enrolamento, paradas inesperadas do transformador podem ser evitadas, além de possibilitar uma programação e otimização das atividades de manutenção do mesmo.

A proposição do método de localização utilizado neste trabalho veio da averiguação, na literatura consultada, da existência de poucas técnicas de localização das *PDs* desenvolvidas exclusivamente com dados de simulação computacional, com aplicabilidade em situações reais, para enrolamentos com configuração *layer-type* e *disk-type*. Este caso é fundamental em situações práticas, onde não existem derivações nos enrolamentos dos transformadores para a realização de experimentos de injeção de descargas, ou quando não se tem acesso a estes terminais. Para a localização propriamente dita, é empregada a Regressão Linear Múltipla (modelos *MLR*), técnica ainda não investigada neste tipo de problema, a partir de características estatísticas e de componentes principais (*PCA*) descritivas das formas de onda nos terminais dos enrolamentos.

Além de uma estratégia para a localização das *PDs*, um método para geração experimental de pulsos de corrente representativos destas descargas, em condições ainda incipientes da degradação do isolamento, é também proposto neste trabalho, visando contornar algumas limitações encontradas nos métodos normalmente empregados na literatura. Neste sentido, é proposta a realização de distúrbios capacitivos em derivações de um enrolamento devidamente alimentado, os quais possibilitam a geração de rápidos pulsos de corrente, com tempos de subida similares às *PDs* e com quantidades de carga controladas.

Para a avaliação dos métodos de geração e localização das *PDs*, um protótipo de enrolamento foi projetado e construído, sendo empregado neste trabalho na geração de sinais experimentais. Além deste enrolamento, os capacitores empregados nos experimentos foram também desenvolvidos, de modo a propiciarem a obtenção das magnitudes desejadas para as descargas parciais.

Os modelos *MLR* de localização das *PDs* foram ajustados a partir de dados característicos, estatísticos e *PCA*, advindos de simulações computacionais dos enrolamentos considerados, sendo as espiras destes últimos modelados como múltiplas linhas de transmissão

acopladas. Além do protótipo construído, dois estudos de casos foram avaliados, relativos à aplicação da *MLR* na localização das *PDs* em enrolamentos de transformadores *layer-type* e *disk-type* reais. Para todas as situações, o desempenho da *MLR* na localização das *PDs* foi comparado com Redes Neurais Artificiais (*ANNs*).

Como verificado no Capítulo 6, apesar das formas de onda das *PDs* experimentalmente medidas e simuladas apresentarem significativas diferenças, atribuídas às diversas simplificações empregadas na modelagem computacional do protótipo, características extraídas das mesmas apresentaram padrões variacionais semelhantes, com relação ao local de ocorrência das descargas. Tal fato, permite validar, ainda que indiretamente, a forma proposta para a geração experimental dos pulsos das *PDs*. No que concerne a localização destes pulsos, a estratégia *MLR*, desenvolvida com as características estatísticas advindas dos dados de simulação, possibilita uma localização satisfatória dos mesmos. Para características *PCA*, um pior desempenho é obtido. Para os estudos de casos, o percentual de acertos na validação, ainda que utilizando apenas dados de simulação, indica que a *MLR* pode ser aplicada na localização de *PDs* tanto em enrolamentos *layer-type* com várias camadas, quanto em enrolamentos *disk-type*.

Em comparação com a técnica *ANN*, pelos resultados obtidos, pode-se notar que a estratégia *MLR* apresenta desempenho equivalente, se mostrando como uma alternativa para a localização das *PDs* ao longo dos enrolamentos dos transformadores de potência. Não obstante, uma vez que os modelos de regressão constituem simples equações polinomiais, seu emprego em *softwares* para monitoramento *on-line/on-site* pode ser mais simplificado.

7.3 Propostas de continuidade

A partir do que foi apresentado e discutido nesta tese, pode-se destacar algumas propostas de continuidade:

1. Reduzir o número de aproximações na modelagem *MTL* dos enrolamentos, a fim de

se obter formas de onda de simulação mais coerentes. Neste ponto, principalmente, estimar as capacitâncias do enrolamento de maneira mais precisa e calcular a matriz de indutâncias de forma direta;

2. Ajuste de modelos *MLR* de maneira separada, para cada derivação do enrolamento, em conjunto com uma estrutura de decisão para definição do local de ocorrência;
3. Ajuste e análise de modelos *MLR* para outras características dos sinais terminais no tempo, como características *Wavelets*, e no domínio da frequência;
4. Verificar o desempenho da *MLR* na situação de múltiplas *PDs* nos enrolamentos, situação que normalmente ocorre nos casos reais;
5. Verificar o desempenho da *MLR* para *PDs* na presença de interferências, como o corona de linhas de transmissão adjacentes ao transformador ou mesmo descargas parciais ocorridas no óleo, e ruídos, situações encontradas nos casos reais, nos locais onde os transformadores de potência estão instalados (subestações);

7.4 Publicações

Artigo publicado em periódico:

- Gonçalves Júnior, A. M., de Paula, H., Boaventura, W. C (2018). Practical Partial Discharge Pulse Generation and Location within Transformer Windings Using Regression Models Adjusted With Simulated Signals. *Electric Power Systems Research*, vol. 157: 118 – 125. doi: 10.1016/j.epsr.2017.12.013.

Artigo submetido ao periódico *International Transactions on Electrical and Energy Systems*, em 2017:

- Gonçalves Júnior, A. M., de Paula, H., Boaventura, W. C. Multiple Linear Regression Models for Partial Discharge Location along Transformer Windings.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd Rahman, M. S., Lewin, P. L., e Rapisarda, P. (2016). Autonomous localization of partial discharge sources within large transformer windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23(2):pp. 1088 – 1098.
- Akbari, A., Werle, P., Borsi, H., e Gockenbach, E. (2002). Transfer function-based partial discharge localization in power transformers: a feasibility study. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18(5):pp. 22 – 32.
- Ali, M., Eley, C., Emsley, A. M., Heywood, R., e Xaio, X. (1996). Measuring and understanding the ageing of kraft insulating paper in power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 12(3):pp. 28 – 34.
- Ang, S. P. e Salam, M. A. (2012). Modeling of high frequency characteristic of a 6.6 kV transformer. *47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, vol. 1:pp. 1 – 6.
- Arshad, M. e Islam, S. M. (2011). Significance of cellulose power transformer condition assessment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19(5):pp. 1591 – 1598.

- Aschenbrenner, D., Kranz, H. G., Rutgers, W. R., e van den Aardweg, P. (2005). On line PD measurements and diagnosis on Power Transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12(2):pp. 216 – 222.
- Austin, J. e Marshall, P. (1978). Partial discharge location in transformers and reactors by waveshape recognition. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97(6):pp. 2041 – 2044.
- Bagheri, M., Naderi, M. S., Blackburn, T., e Phung, T. (2013). Frequency response analysis and short-circuit impedance measurement in detection of winding deformation within power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, No. 3:pp. 33 – 40.
- Bartnikas, R. (2002). Partial discharges. their mechanism, detection, and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9(5):pp. 763 – 808.
- Behjat, V. e Vahedi, A. (2011). Numerical modelling of transformers internurn faults and characterising the fault transformer behaviour under various faults and operating conditions. *IET Electric Power Applications*, vol. 5:pp. 415 – 430.
- Bhide, R. S., Srinivas, M. S. S., Banerjee, A., e Somakumar, R. (2010). Analysis of winding inter-turn fault in transformer: A review and transformer models. *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, vol. 1:pp. 1 – 7.
- Bua-Nunez, I., Posada-Roman, J. E., Rubio-Serrano, J., e Garcia-Souto, J. A. (2014). Instrumentation system for location of partial discharges using acoustic detection with piezoelectric transducers and optical fiber sensors. *IEEE Transactions Instrumentation and Measurement*, vol. 63(5):pp. 1002 – 1013.
- Cavallini, A., Chen, X., Montanari, G. C., e Ciani, F. (2010). Diagnosis of EHV and HV transformers through an innovative partial discharge-based technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25(2):pp. 814 – 824.

- CIGRE (1983). An international survey on failures in large power transformers in service. *Electra*, vol. 88:pp. 21 – 48.
- CIGRE (2007). Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformer.
- Coenen, S. e Tenbohlen, S. (2012). Location of PD sources in power transformers by UHF and acoustic measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19(6):pp. 1934 – 1940.
- Darabad, V. P., Vakilian, M., Phung, B., e Blackburn, T. R. (2013). An efficient diagnosis method for data mining on single pd pulses of transformer insulation defect models. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20(6):pp. 2061 – 2072.
- de Leon, F. e Semlyen, A. (1992). Reduced order model for transformer transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7(1):pp. 361 – 369.
- Del Vecchio, R. M., Poulin, B., Feghali, P. T., Shah, D. M., e Ahuja, R. (2010). *Transformer Design Principles: With Applications to Core-form Power Transformers*. CRC Press - Taylor & Francis Group.
- Duval, M. (2002). A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18(3):pp. 8 – 17.
- Duval, M. e Dukarm, J. (2005). Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21(4):pp. 21 – 27.
- Efroymson (1960). *Multiple Regression Analysis*. Wiley, New York.
- Eldery, M. A., Abdel-Galil, T. K., El-Saadany, E. F., e Salama, M. M. A. (2006). Identification of partial discharge locations in transformer winding using PSD estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21(2):pp. 1022 – 1023.
- Eleftherion, P. M. (1995). Partial discharge XXI - acoustic emission based PD source location in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 11(6):pp. 22 – 26.

- Fabre, J. e Pichon, A. (1960). Deteriorating processes and products of paper in oil. *CIGRE paper 137*, vol. 1:.
- Fisher, R. A. (1925). *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Fuhr, J. (2005). Procedure for identification and localization of dangerous PD sources in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12(5):pp. 1005 – 1014.
- Fuhr, J. (2009). Benefits and limits of advanced methods used for transformer diagnostics. *IEEE Electrical Insulation Conference - EIC*, vol. 1:pp. 262 – 272.
- Fuhr, J. (2012). Condition assessment of power transformers. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, vol. 1:pp. 9 –17.
- Fukunaga, K. (1990). *Introtuction to Statistical Pattern Recognition*. Academic Press.
- Giese, K. (1994). The effects of cellulose insulation quality on electrical intrinsic strength. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 10(5):pp. 38 – 42.
- Gomez, N. A., Wilhelm, H. M., Santos, C. C., e Stocco, G. B. (2014). Dissolved gas analysis (DGA) of natural ester insulating fluids with different chemical compositions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21(3):pp. 1071 – 1078.
- Gui, J., Gao, W., Tan, K., e Gao, S. (2003). Locating partial discharge in power transformer by electrical method. *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 1:pp. 459 – 462.
- Guillen, D., Idarraga-Ospina, G., Mombello, E., e Cabral, S. (2016). Partial discharges location in transformer winding using wavelets and kullback-leibler divergence. *Electric Power Systems Research*, vol. 136(1):pp. 398 – 405.

- Guillen, D., Ldarraga-Ospina, G., e Mombello, E. (2014). Partial discharge location in power transformer windings using the wavelet laplace function. *Electric Power Systems Research*, Vol. 111:pp. 71 – 77.
- Halliday, D., Resnick, R., e Walker, J. (2008). *Fundamentals of Physics - 8th edition*. John Wiley & Sons.
- Harlow, J. H., editor (2004). *Electric Power Transformer Engineering*. CRC Press.
- Harrold, R. T. e Sletten, A. M. (1970). Corona location in transformers by radio frequency spectrum analysis, part I: Theory. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-89(7):pp. 1584 – 1590.
- Haykin, S. e Veen, B. V. (1999). *Signals and Sistems*. John Wiley & Sons.
- Hettiwatte, S., Crossley, P., Wang, Z., Darwin, A., e Edwards, G. (2002). Simulation of a transformer winding for partial discharge propagation studies. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2:pp. 1394 – 1399.
- Hettiwatte, S. N. e Wang, Z. D. Crossley, P. A. (2005). Investigation of propagation of partial discharges in power transformers and techniques for locating the discharge. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 152(1):pp. 25 – 30.
- Hikita, M., Okabe, S., Murase, H., e Okubo, H. (2008). Cross-equipment evaluation of partial discharge measurement and diagnosis techniques in electric power apparatus for transmission and distribution. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15(2):pp. 505 – 518.
- Hohlein, I. e kachler, A. J. (2005). Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 2 - influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing system. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21(5):pp. 20 – 24.

- Homaei, M., Moosavian, S. M., e Illias, H. A. (2014). Partial discharge localization in power transformers using neuro-fuzzy technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29(5):pp. 2066 – 2076.
- Homagk, C., Mossner, K., e Leibfried, T. (2008). Investigation on degradation of power transformer solid insulation material. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - CEIDP*, vol. 1:pp. 75 – 78.
- Hosseini, S., Vakilian, M., e Gharehpetian, G. (2008). Comparison of transformer detailed models for fast and very fast transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23(2):pp. 733 – 741.
- Hosseini, S. M. H. e Baravati, P. R. B. (2017). New high frequency multi-conductor transmission line detailed model of transformer winding for PD study. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24(1):pp. 316 – 323.
- Howells, E. e Norton, E. T. (1978). Detection of partial discharges in transformers using acoustic emission techniques. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97(5):pp. 1538 – 1549.
- Howells, E. e Norton, E. T. (1981). Location of partial discharge sites in on-line transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100(1):pp. 158 – 162.
- IEC60270 (2000). High voltage test techniques - partial discharge measurements.
- IEEEStdC57.104 (2008). Ieee guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers.
- IEEEStdC57.12.90 (2006). Ieee standard test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers and guide for short-circuit testing of distribution and power transformer.

- Jafari, A. M. e Akbari, A. (2007). Partial discharge location in transformer windings using multi-conductor transmission line. *Electric Power Systems Research*, vol. 78(6):pp. 1028 – 1037.
- Jafari, A. M., Akbari, A., Mirzaei, H. R., Kharezi, M., e Allahbakhshi, M. (2008). Investigating practical experiments of partial discharge localization in transformers using winding modeling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15(4):pp. 1174 – 1182.
- James, R., Phung, B., e Su, Q. (1989). Application of digital filtering techniques to the determination of partial discharge location in transformers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 24(4):pp. 657 – 668.
- Jayalalitha, S. e Jayashankar, V. (2006). A correlation method for detection of partial discharges in transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21(1):pp. 531 – 532.
- Jewell, W. T. (1990). Transformer design in the underground power engineering laboratory. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5(2):pp. 499 – 505.
- Jeyabalan, V. (2010). Least deviation methods for location of partial discharge in transformer windings. *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, International Electrotechnical Commission:pp. 1 – 4.
- Jeyabalan, V. (2011). Coherent phase detection technique for location of partial discharge in transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26(4):pp. 2885 – 2886.
- Jeyabalan, V. e Usa, S. (2009). Frequency domain correlation technique for PD location in transformer winding. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16(4):pp. 1160 – 1167.
- Jeyabalan, V. e Usa, S. (2011). Statistical techniques for partial-discharge location in transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26(3):pp. 2064 – 2065.

- Judd, M. D., Yang, L., e Hunter, I. B. B. (2005). Partial discharge monitoring for Power Transformers using UHF sensors. Part 1: Sensors and signal interpretation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21(2):pp. 5 – 15.
- Kallberg, B. (1980). Location of partial discharges in Power Transformers by computation and measurement of capacitively transmitted voltage pulses. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99(2):pp. 589 – 596.
- Kane, C. e Golubev, A. (2010). Field results of monitoring partial discharges on in-service large power transformers. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, vol. 1:pp. 1 – 8.
- Kiiza, R., Niasar, M., Nikjoo, R., Wang, X., e Edin, H. (2014). Change in partial discharge activity as related to degradation level in oil-impregnated paper insulation: effect of high voltage impulses. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21:pp. 1243 – 1250.
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., e Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Newness.
- Kumar, A. S., Gupta, R. P., Udayakumar, K., e Venkatasami, A. (2008). Online partial discharge detection and location techniques for condition monitoring of power transformers: A review. *IEEE international Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, vol. 1:pp. 927 – 931.
- Kuo, C. C. (2010). Artificial identification system for transformer insulation aging. *Expert Systems with Applications*, vol. 37:pp. 4190 – 4197.
- Kweon, D., Chin, S., Kwak, H., Kim, J., e Song, K. (2005). The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20(3):pp. 1976 – 1983.
- Leithold, L. (1994). *O Cálculo com Geometria Analítica*, volume 1. HARBRA Ltda.

- Lelekakis, N., Guo, N., Martin, D., Wijaya, J., e Susa, D. (2012). A field study of aging in paper-oil insulation systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28(1):pp. 12 – 19.
- Lelekakis, N., Wijaya, J., Martin, D., e Susa, D. (2014). The effect of acid accumulation in power-transformer oil on the aging rate of paper insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30(3):pp. 19 – 26.
- Leus, V. e Elata, D. (2004). Fringing field effect in electrostatic actuators. techreport Technical Report No. ETR-2004-2, Technion-Israel Institute of Technology.
- Li, J., Si, W., Yao, X., e Li, Y. (2009). Partial discharge characteristics over differently aged oil/pressboard interfaces. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16(6):pp. 1640 – 1647.
- Liao, R., Tang, C., Yang, Y., e Grzybowski, S. (2008). Thermal aging micro-scale analysis of power transformer pressboard. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15(5):pp. 1281 – 1287.
- Lin, C. E., Ling, J. M., e Huang, C. L. (1993). An expert system for transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8(1):pp. 231 – 238.
- Lundgaard, L. E. (1992). Partial discharge XIV - acoustic partial discharge detection-practical application. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 8(5):pp. 34 – 43.
- Lundgaard, L. E., Hansen, W., Linhjell, D., e Terence, J. P. (2004). Aging of oil-impregnated paper in power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19(1):pp. 230 – 239.
- Marques, A., de Jesus Ribeiro, C., Azevedo, C. H., Lopes dos Santos, J., de Carvalho Sousa, F., e da Cunha Brito, L. (2014). Power transformer disruptions - a case study. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30(2):pp. 17 – 21.

- McNutt, W. J. (92). Insulation thermal life considerations for transformer loading guides. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7(1):pp. 392 – 401.
- Metwally, I. (2011). Failures, monitoring and new trends of power transformers. *IEEE Potentials*, vol. 30(3):pp. 36 – 43.
- Minhas, M. S. A., Reynders, J. P., e De Klerk, P. J. (1999). Failures in power system transformers and appropriate monitoring techniques. *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, vol. 1:pp. 94 – 97.
- Mohamed, R. e Lewin, P. L. (2009). Partial discharge location in high voltage transformers. *IEEE Electrical Insulation Conference*, International Electrotechnical Commission:200 – 204.
- Montgomery, D. C. e Myers, R. H. (1995). *Response Surface Metodology: Process and product Optimization using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Canada.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., e Vining, G. G. (2006). *Introduction to Linear Regression Analysis*. Wiley.
- Montgomery, D. C. e Runger, G. C. (2011). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons.
- Montsinger, V. M. (1930). Abridgment of loading transformers by temperature. *Journal of The American Institute of Electrical Engineers (AIEE)*, vol. 49(4):pp. 293 – 297.
- Murugan, R. e Ramasamy, R. (2015). Failure analysis of power transformers for effective maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 55:pp. 182 – 192.
- Naderi, M. S., Gharehpetian, G. B., e Abedi, M. (2008). Modeling and detection of transformer internal incipient fault during impulse test. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15:pp. 284 – 291.

- Naderi, M. S., Vakilian, M., Blackburn, T. R., Phung, B. T., Naderi, M. S., e Nasiri, A. (2007). A hybrid transformer model for determination of partial discharge location in transformer winding. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14(2):pp. 436 – 443.
- Nafar, M., Niknam, T., e Gheisari, A. (2011). Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33:pp. 493 – 499.
- Nafisi, H., Davari, M., Abedi, M., e Gharehpetian, G. (2009). Using fuzzy ARTmap neural network for determination of partial discharge location in power transformers. *IEEE Bucharest PowerTech*, International Electrotechnical Commission:pp. 1 – 4.
- Niasar, M. G., Taylor, N., Janus, P., Wang, X., Edin, R., e Kiiza, R. C. (2015). Partial discharges in a cavity embedded in oil-impregnated paper: Effect of electrical and thermal aging. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22(2):pp. 1071 – 1079.
- Okabe, S., Ueta, G., Wada, H., e Okubo, H. (2010). Partial discharge-induced degradation characteristics of insulation structure constituting oil-immersed power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 17(5):pp. 1649 – 1656.
- Palmer, H. B. (1937). The capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 56(3):pp. 363 – 366.
- Paul, C. R. (2008). *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. Wiley-Interscience, New York.
- Pearson, J., Hampton, B. F., Judd, M. D., Pryor, B., e Coventry, P. (1998). Experience with advanced in-service condition monitoring techniques for GIS and transformers. *EE Col-*

- loquium on HV Measurements, Condition Monitoring and Associated Database Handling Strategies*, vol. 1:pp. 8/1 – 8/10.
- Popov, M., Van der Sluis, L., Smeets, R. P. P., e Roldan, J. L. (2007). Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22(1):pp. 238 – 247.
- Quadros, A. M. (2006). *Papel NOMEX utilizado em transformadores: avaliação das características e degradação térmica*. Disserta de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Rahman, M. S. A., Rapisarda, P., e Lewin, P. L. (2013). Construction of finite impulse wavelet filter for partial discharge localisation inside a transformer winding. *IEEE Electrical Insulation Conference*, International Electrotechnical Commission:pp. 30 – 34.
- Rawlings, J. O., Pantula, S. G., e Dickey, D. A. (1998). *Applied Regression Analysis: a Research tool*. Springer.
- Raymond, W. J. K., Illias, H. A., Bakar, A. H. A., e Mokhlis, H. (2015). Partial discharge classifications: review of recent progress. *Measurement*, vol. 68(1):pp. 164 – 181.
- Rotby, S. N., El-Hag, A. H., Salama, M. M. A., e Bartnikas, R. (2012). Partial discharge detection and localization inside the winding of power transformer. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, International Electrotechnical Commission:pp. 84 – 87.
- Rubio-Serrano, J., Rojas-Moreno, M. V., Posada, J., Martinez-Tarifa, J. M., Robles, G., e Garcia-Souto, J. A. (2012). Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19(5):pp. 1569 – 1578.
- Ryan, T. (2009). *Estatística moderna para a engenharia*. Elsevier.

- Sahoo, N. C., Salam, M. A., e Bartnikas, R. (2005). Trends in partial discharge pattern classification: A survey. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12(2):pp. 248 – 264.
- Sarikhani, A., Darabi, A., e Banejad, M. (2007). Partial discharge locating in power transformer using wavelet transform of bushing and grounded neutral currents. *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC*, International Electrotechnical Commission:pp. 1 – 6.
- Schwarz, R., Judendorfer, T., e Muhr, M. (2008). Review of partial discharge monitoring techniques used in high voltage equipment. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, vol. 1:pp. 400 – 403.
- Shlens, J. (2014). A tutorial on principal component analysis. *CoRR*, abs/1404.1100.
- Shroff, D. H. e Stannett, A. W. (1985). A review of paper aging in power transformers. *IEE Proceedings Conference on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 132(6):pp. 312 – 319.
- Shuai, H., Qingmin, L., Chengrong, L., e Jiangyan, Y. (2014). Electrical and mechanical properties of the oil-paper insulation under stress of the hot spot temperature. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21(1):pp. 179 – 185.
- Sinaga, H. H., Phung, B. T., e Blackburn, T. R. (2012). Partial discharge localization in transformers using UHF detection method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19(6):pp. 1891 – 1900.
- Skibinski, G. L., Kerkman, R. J., Leggate, D., Pankau, J., e Schlegel, D. (1998). Reflected wave modeling techniques for PWM AC motor drives. *IEEE 13th APEC*, vol. 2(1):pp. 1021 – 1029.
- Sokolov, V., Berler, Z., e Rashkes, V. (1999). Effective methods of assessment of insulation system conditions in power transformers: a view based on practical experience. *Procee-*

- dings of Electrical Insulation coference and Electrical Manufacturing & coil winding*, vol. 1:pp. 659 – 667.
- Stone, G. C. (2005). Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12(5):pp. 891 – 904.
- Tang, C., Liao, R., e Yang, L. (2008). Nanostructures study on power transformer insulation paper under electrical and thermal stresses. *3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems - NEMS*, vol. 1:pp. 292 – 295.
- Tenbohlen, S., Denissov, D., Hoek, S. M., e Markalous, S. M. (2008). Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15(6):pp. 1544 – 1552.
- Van Bolhuis, J. P., Golski, E., e Smit, J. J. (2002). Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17(2):pp. 528 – 536.
- Velandy, J. (2014). Future template numerical interpretation techniques for PD pulse location in transformer windings. *Electric Power Systems Research*, 112:pp. 37 – 47.
- Wackerly, D. D., Mendenhall III, W., e Scheaffer, R. L. (2008). *Mathematical Statistics with Applications*. Thomson Brooks/Cole.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., e Ye, K. (2012). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. Prentice Hall.
- Wang, H., Li, C., e He, H. (2010). Influence of temperature to development processes of surface discharges in oil-paper insulation. *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, vol. 1:pp. 1 – 4.

- Wang, M., Vandermaar, A. J., e Srivastava, K. D. (2002). Review of condition assessment of power transformers in service. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18(6):pp. 12 – 25.
- Wang, Z., Hettiwatte, S., e Crossley, P. (2005). A measurements-based discharge location algorithm for plain disc winding power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12(3):pp. 416 – 422.
- Wang, Z., Liu, Y., e Griffin, P. J. (1998). A combined ANN and expert system tool for transformer fault diagnosis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13(4):pp. 1224 – 1229.
- Wang, Z. D., Crossley, P. A., e Cornick, K. J. (1999). Partial discharge location in Power Transformers using the spectra of the terminal current signals. *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, vol. 5:pp. 58 – 61.
- Webb, A. R. (2002). *Statistical Pattern Recognition*. John Wiley & Sons.
- Wellauer, M. (1973). *Introdução as técnicas das altas tensões*. Polígono, São Paulo.
- Wenzel, D., Borsi, H., e Gockenbach, E. (1994). A new method of partial discharge localization on transformers via the karhunen-loève-transform. *Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 2:pp. 622 – 625.
- Wenzel, D., Borsi, H., e Gockenbach, E. (1996). A new approach for partial discharge recognition on transformers on-site by means of genetic algorithms. *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, vol. 1:pp. 57 – 60.
- Wisniak, J. e Polishuk, A. (1999). Analysis of residuals - a useful tool for phase equilibrium data analysis. *Fluid Phase Equilibria*, vol. 164(1):pp. 61 – 82.

- Wu, M., Cao, H., Cao, J., Nguyen, H., Gomes, J. B., e Krishnaswamy, S. P. (2015). An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31(6):pp. 22 – 35.
- Yang, Y., Chengrong, L., Zhong, Z., Shaoyu, L., e Jixian, M. (2010). Lab investigation of PD development in transformer winding. *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, International Electrotechnical Commission:pp. 1 – 4.
- Yoshida, H., Ishioka, Y., Suzuki, T., Yanari, T., e Teranishi, T. (1987). Degradation of insulating materials of transformers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-22(6):pp. 795 – 800.
- Zhong, Z., Yang, Y., Chengrong, L., Shaoyu, L., e Jixian, M. (2010). Characteristics of partial discharge during its evolution in transformer winding. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, vol. 1:pp. 1 – 4.

APÊNDICE A

EQUIPAMENTOS DA BANCADA EXPERIMENTAL

A seguir, são descritas as principais características dos equipamentos integrantes da bancada experimental utilizada neste trabalho:

- Transformador elevador:
 - fabricado em 2000 por Romagnole Produtos Elétricos Ltda, Brasil;
 - fabricado de acordo com as recomendações da norma *NBR5440*;
 - monofásico;
 - $S = 10KVA$, $V_1 = 220V$ ou $120V$, $f = 60Hz$, $V_{2(max)} = 6KV$, $Z = 2,6pu$;
 - óleo isolante tipo *A* e $NBI = 6KV$.
- *Varivolt* - Transformador variador de tensão:
 - fabricado pela *STP* - Sociedade Técnica Paulista Ltda, Brasil;
 - tipo *VT* – 290;
 - trifásico;
 - $S = 9KVA$, $V_1 = 220V$, $f = 60Hz$, $V_{2(max)} = 240V$, $I_{2(max)} = 22A$.
- Sensores de corrente de alta frequência - *HFCTs*:

-
- fabricados pela *Pearson Electronics Inc*, USA;
 - modelo 4100;
 - faixa de passagem entre $\sim 140Hz$ e $\sim 35MHz$;
 - $Z = 50\Omega$, $I_{max} = 500A$, $I_{rms} = 5A$;
 - sensibilidade de $1V/A + 1/ - 0\%$.
- Sensor de alta tensão:
 - fabricado pela *Tektronix Inc*, USA;
 - modelo *P6015A*;
 - faixa de passagem até $75MHz$;
 - $V_{max} = 20KV$ CC ou rms, ou $40KV$ de pico, $Z = 100M\Omega/3pF$;
 - atenuação de $1000x$.
 - Osciloscópio digital:
 - fabricado pela *Tektronix Inc*, USA;
 - modelo *TDS2014B*;
 - 4 canais com possibilidade de *trigger* externo;
 - taxa de amostragem de até $1GS/s$ em todos os canais;
 - possibilidade de gravação de até 2500 amostras, inclusive em dispositivo *USB*;
 - faixa de passagem analógica de $100MHz$;
 - resolução vertical de 8 *bits*;
 - sensibilidade vertical de $2mV$ à $5V$ por divisão;
 - base de tempo entre $5ns$ e $50s$ por divisão.

APÊNDICE B

CONFIGURAÇÕES DE CAPACITORES

- Capacitância entre dois condutores circulares paralelos:

A figura B.1 ilustra os parâmetros envolvidos na estimação da capacitância entre dois condutores circulares em paralelo, realizada conforme equação (B.1), de acordo com Paul (2008).

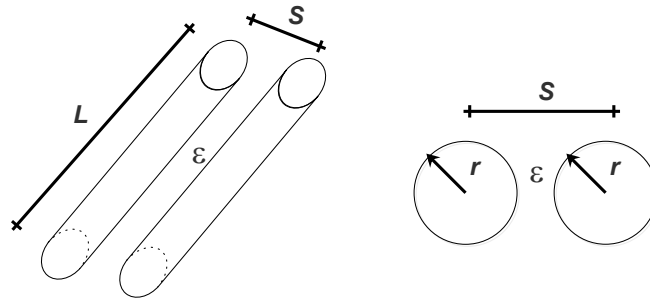


Figura B.1: Configuração de capacitor de condutores circulares paralelos.

$$C = \frac{\pi \epsilon L}{\ln(S/r)} \quad (F). \quad (B.1)$$

- Capacitância condutores concêntricos:

A figura B.2 ilustra os parâmetros envolvidos na estimação da capacitância entre dois condutores concêntricos, realizada conforme equação (B.2), de acordo com Paul (2008).

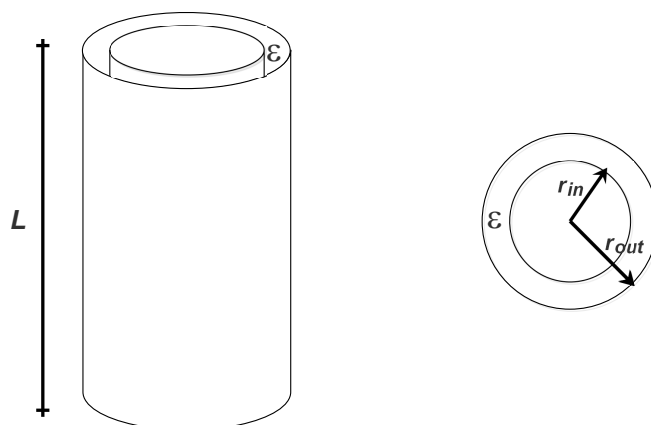


Figura B.2: Configuração de capacitor cilíndrico.

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln(r_{out}/r_{in})} \quad (F). \quad (\text{B.2})$$

APÊNDICE C

**TABELA DA DISTRIBUIÇÃO F PARA UM NÍVEL DE
SIGNIFICÂNCIA $\alpha = 0,05$**

Tabela C.1: Tabela da distribuição F para um nível de significância $\alpha = 0,05$.

g_{den}	g_{num}																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	
1	161,40	199,50	215,70	224,60	230,20	234,00	236,80	238,90	240,50	241,90	243,90	245,90	248,00	249,10	250,10	251,10	252,20	253,30	254,30	
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,49	
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,60	8,57	8,55	8,53	
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63	
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,47	4,43	4,40	4,36	
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,78	3,74	3,70	3,67	
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23	
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,05	3,00	2,97	2,93	
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71	
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,54	2,49	2,45	2,40	
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30	
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21	
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13	
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,21	2,16	2,11	2,07	
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01	
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01	1,96	
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,07	2,02	1,97	1,92	
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88	
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	2,00	1,95	1,90	1,84	
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,97	1,92	1,87	1,81	
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78	
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,92	1,86	1,81	1,76	
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,90	1,84	1,79	1,73	
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,88	1,82	1,77	1,71	
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,86	1,80	1,75	1,69	
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,78	1,73	1,67	
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65	
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,69	
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,80	1,74	1,68	1,62	
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51	
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39	
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,49	1,42	1,35	1,25	
∞	3,84	2,99	2,60	2,57	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00	

APÊNDICE D

TABELA DA DISTRIBUIÇÃO T

Tabela D.1: Tabela da distribuição t .

gl	$\alpha/2$						
	0,100	0,050	0,025	0,010	0,005	0,001	0,001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	318,289	636,578
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,328	31,600
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,214	12,924
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,894	6,869
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,408
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610	3,922
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,768
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,689
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,660
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,160	3,373
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,091	3,291