



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

**Sistema de Detecção e Localização de
Descargas Parciais com Rede de
Sensores sem Fio**

Rômulo Afonso Luna Vianna de Omena

Prof. José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.
Orientador

Prof. Jaidilson Jó da Silva, D.Sc.
Orientador

Campina Grande – PB
Março de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Sistema de Detecção e Localização de Descargas Parciais com Rede de Sensores sem Fio

Rômulo Afonso Luna Vianna de Omena

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Prof. José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.
Prof. Jaidilson Jó da Silva, D.Sc.
Orientadores

Campina Grande – PB

Março de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

O55s	<p>Omena, Rômulo Afonso Luna Vianna de. Sistema de detecção e localização de descargas parciais com rede de sensores sem fio / Rômulo Afonso Luna Vianna de Omena. - Campina Grande, 2018. 82 f. : il. color.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018. "Orientação: Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto, Prof. Dr. Jaidilson Jó da Silva". Referências.</p> <p>1. Descargas Parciais. 2. Detecção. 3. RF. 4. RSS <i>Fingerprinting</i>. 5. Rede de Sensores sem Fio. I. Rocha Neto, José Sérgio da. II. Silva, Jaidilson Jó da. III. Título.</p> <p>CDU 621.314(043)</p>
------	---

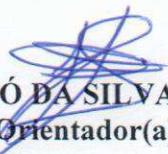
"SISTEMA DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS COM REDE DE SENSORES SE FIO"

RÔMULO AFONSO LUNA VIANNA DE OMENA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/03/2018



JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



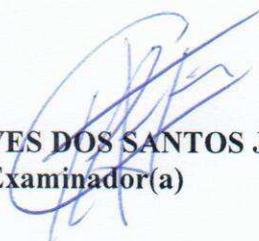
JAIDILSON JÓ DA SILVA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



PÉRICLES REZENDE BARROS, Ph.D., UFCG
Examinador(a)



GUTEMBERG GONÇALVES DOS SANTOS JÚNIOR, Dr., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Reinaldo e Simone, e aos meus irmãos Reinaldo Filho e Manoela, por sempre se fazerem presentes e pelos momentos de descontração.

À minha esposa Poliana Urtiga, por todo o apoio prestado durante essa jornada e também por compreender os momentos em que estive ausente para dedicar-me a este trabalho.

À família Nascimento Urtiga em Campina Grande-PB, especialmente à Ana por todo o suporte durante as minhas estadias na cidade e ao Rui Jr. pelas ajudas e caronas até a UFCG.

Aos meus orientadores, Prof. José Sérgio e Prof. Jaidilson, por todo o conhecimento disseminado e pelas críticas e sugestões, no qual me faz tornar um profissional melhor.

Ao Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC), por prover a estrutura e os equipamentos necessários para a execução dos experimentos.

A todos os colegas do LIEC, principalmente ao Tony Cavalcanti por todo o apoio prestado e ao Simões pela presteza e paciência para confeccionar as placas de circuito impresso utilizadas neste trabalho.

Ao Instituto Federal de Alagoas, por possibilitar, através da Resolução Nº 26/CS-2016, a redução da carga horária dentro da instituição para docentes em pós-graduação, fator imprescindível para a realização deste trabalho de mestrado.

A todos os meus familiares e amigos, pelo apoio e pela comemoração em cada etapa vencida.

Resumo

Falhas nos isolamentos dos sistemas de potência podem causar danos irreparáveis e interrupção do fornecimento de energia. Uma das causas em potencial dessas falhas é a ocorrência de descargas parciais. Descargas parciais (DP) são descargas elétricas que atravessam parcialmente o isolamento entre condutores. O monitoramento desse fenômeno é uma maneira de se diagnosticar o isolamento para que decisões possam ser tomadas a respeito do equipamento. Um sistema de monitoramento *online* de descargas parciais, de baixo custo, pode ser justificado quando se comparado ao valor dos ativos presentes num sistema de potência. Tendo em vista esse problema, nesta Dissertação de Mestrado tem-se como objetivo o desenvolvimento de um sistema baseado em uma rede de sensores sem fio integrada a um instrumento virtual, para detecção e localização de descargas parciais. O princípio utilizado é de que os transientes gerados por uma fonte de DP irradiam ondas de radiofrequência (RF). No sistema proposto, os nós sensores são compostos de uma antena, um amplificador RF de baixo ruído, um detector RF, um microcontrolador e um módulo ZigBee. Os dados são enviados através da rede sem fio para um nó central, no qual recebe os dados e os envia para um computador. Um instrumento virtual sendo executado no computador, estima a localização da fonte de descarga parcial utilizando a técnica do RSS (*Received Signal Strength*) *Fingerprinting*. A estimativa da localização é calculada pelo método KNN (*K-Nearest Neighbor*) e WKNN (*Weighted K-Nearest Neighbor*).

Palavras-chave: Descargas Parciais, Detecção, Localização, RF, RSS *Fingerprinting*, Rede de Sensores sem Fio.

Abstract

Failures in insulation of power systems equipment can causes irreparable damages and interruption of power supplying. A potential cause for these failures is the occurrence of partial discharges. Partial discharges (PD) are electrical discharges that partially bridges the insulation between conductors. The monitoring of this phenomena is a way to diagnose insulation and take a decision with respect to the equipment. An online system for partial discharge monitoring, with a low cost, can be justified when compared to assets value that operates in a power system. Taking into account this problem, this Master's Dissertation aims the development of a system based on a wireless sensors network (WSN) integrated to a virtual instrument (VI), for partial discharges detection and localization. The used principle is that transients generated by a PD source irradiates radio frequency (RF) waves. In the system proposed, the sensors nodes are composed by an antenna, a RF low noise amplifier, a RF power detector, a microcontroller and a ZigBee module. The data are sent through wireless network to a central node, in which receive data and send to computer. A virtual instrument being executed in computer, estimates the PD source localization using Received Signal Strength (RSS) Fingerprinting technique. Localization estimation is calculated by K-Nearest Neighbor (KNN) and Weighted K-Nearest Neighbor (WKNN) methods.

Keywords: Partial Discharges, Detection, Localization, RF, RSS Fingerprinting, Wireless Sensors Network.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivo Geral	3
1.2.1	Objetivos Específicos	3
1.2.2	Organização do Texto	3
2	Teoria de Descargas Parciais	5
2.1	Tipos	7
2.1.1	Descargas Internas	7
2.1.2	Descargas Superficiais	7
2.1.3	Corona	8
2.2	Modelagem	9
2.2.1	Modelo da Capacitância	9
2.2.2	Modelo de Pedersen	12
2.3	Conclusões	14
3	Deteção de Descargas Parciais	15
3.1	Deteção Elétrica	16
3.1.1	Método baseado na IEC 60270	16
3.1.2	HFCT - <i>High Frequency Current Transformer</i>	18
3.1.3	Bobina de Rogowski	19
3.1.4	Radiofrequência (RF)	19
3.2	Deteção Acústica	23
3.3	Deteção Óptica	23
3.4	Deteção Química	23
3.5	Conclusões	24
4	Localização de Descargas Parciais	25
4.1	Localização em Transformadores de Potência	25
4.2	Localização no Espaço Livre	27

4.3	Determinação do TDOA e Estimação da Localização	31
4.3.1	TDOA	31
4.3.2	Estimação da Localização	37
4.4	Conclusões	41
5	Medição e Aquisição de Dados, Emulação do Sinal de DP e Instrumentos Virtuais	42
5.1	Medição e Aquisição de Dados	42
5.2	Emulação do Sinal de DP	47
5.3	Instrumentos Virtuais	49
5.3.1	Fase <i>Offline</i>	49
5.3.2	Fase <i>Online</i>	51
5.4	Conclusões	54
6	Resultados e Discussões	55
6.1	Ambiente I	56
6.1.1	<i>Fingerprinting</i> do Ambiente	58
6.1.2	Testes de Localização	60
6.2	Ambiente II	61
6.2.1	<i>Fingerprinting</i> do Ambiente	63
6.2.2	Testes de Localização	64
6.3	Conclusões	64
7	Considerações Finais	66
7.1	Conclusões	66
7.2	Trabalhos Futuros	67
	Referências Bibliográficas	77
	Apêndice A - Diagramas de Blocos dos Instrumentos Virtuais	78
	Apêndice B - <i>Script</i> Matlab para Estimação da Localização com KNN e WKNN	80
	Apêndice C - Trabalhos submetidos/aceitos em anais de congressos	83

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de isolamento com falhas que podem causar descargas parciais. . .	7
2.2	Exemplo de isolamento com falha que pode causar descargas superficiais. . .	8
2.3	Exemplo de configuração que pode gerar descargas tipo corona.	8
2.4	Modelo capacitivo. (a) Circuito equivalente do isolamento com cavidade interna; (b) correntes transitórias fluindo através do circuito equivalente. . .	10
2.5	Tensão e corrente para o circuito equivalente do modelo capacitivo.	12
2.6	Disposição das cargas na superfície da cavidade antes e depois da DP, e os campos elétricos associados.	14
3.1	Representação do arranjo experimental empregado na medição de descargas parciais.	16
3.2	Arranjo de medição de descargas parciais com corpo de prova em série com impedância de medição.	17
3.3	Arranjo de medição de descargas parciais em ponte balanceada.	18
3.4	Representação do sensor HFCT posicionado num condutor de terra para medição de DP.	19
3.5	Representação de uma bobina de Rogowski construída a partir dos parâmetros a , b e w	19
3.6	Fotografia de um sensor janela instalado para detectar DP durante os testes no transformador.	21
3.7	Fotografia de uma sonda típica com sensor UHF para inserção através das válvulas de óleo.	21
3.8	Duas visões de um sensor UHF interno patentado, para transformadores de potência (Fabricante: Qualitrol DMS).	22
4.1	Diagrama esquemático de um sistema de detecção e localização de DP. . .	28
4.2	Representação da frente de onda de pulsos obtidos por duas antenas. . . .	29
4.3	Determinação do tempo de chegada de um sinal UHF (azul) utilizando o método da energia cumulativa (vermelho).	32

4.4	Método da energia cumulativa (vermelho) claramente não mostra um ponto de joelho reconhecível para determinação do ponto de chegada do sinal UHF.	32
4.5	Energia cumulativa de sinais UHF obtidos de três sensores distribuídos no tanque de um transformador.	33
4.6	(a) Sinal normalizado nos sensores S1 e S4. (b) Visão ampliada para que se perceba a diferença do tempo de chegada dos sinais nos sensores S1 e S4 através do método do primeiro pico.	34
4.7	Gráfico de V^2 versus o tempo de sinais UHF para obtenção da diferença de tempo dos sinais pelo método do limiar.	35
4.8	Determinação do tempo de chegada de uma onda senoidal (azul) com baixa relação sinal-ruído usando o a média da janela de tempo do sinal (vermelho).	35
4.9	Correlação cruzada das formas de onda obtidas dos sensores k ($k = 1, 2, 3$) e do sensor de referência 4. Os picos são marcados com *.	37
5.1	Diagrama de blocos para um nó sensor.	43
5.2	Curva característica e curva do modelo do detector RF LTC5505-1 para uma frequência de 500 MHz.	44
5.3	Fotografia do Módulo XBee-Pro.	46
5.4	Fotografia dos componentes do nó sensor representado pelo digrama de blocos da Figura 5.1.	47
5.5	Dois ciclos de um sinal de referência de 60 Hz e um sinal de 500 MHz representando os pulsos de DP.	48
5.6	Captura da tela do instrumento virtual utilizado na fase <i>offline</i> .	50
5.7	Captura da tela do instrumento virtual utilizado na fase <i>online</i> .	52
5.8	Fluxograma dos passos executados para estimação da localização com os métodos do (a) KNN e (b) WKNN.	53
6.1	Diagrama de blocos representando todo o sistema e uma fonte de DP.	55
6.2	Fotografia do Ambiente I.	56
6.3	Distribuição dos nós sensores no plano cartesiano de referência e pontos para posicionamento da antena para criação do <i>fingerprint</i> no Ambiente I.	57
6.4	Fotografia do computador executando o instrumento virtual e do gerador de RF utilizado.	57
6.5	Distribuição dos nós sensores em ambientes reais de monitoramento com maiores áreas.	58
6.6	Gráfico de contorno da intensidade do sinal recebido em dBm de cada nó em função da posição (X,Y) da antena irradiadora do sinal RF no ambiente I.	59
6.7	Fotografia do Ambiente II.	62
6.8	Distribuição dos nós sensores no plano cartesiano de referência e pontos para posicionamento da antena para criação do <i>fingerprint</i> no Ambiente II.	62

6.9	Gráfico de contorno da intensidade do sinal recebido em dBm de cada nó em função da posição (X,Y) da antena irradiadora do sinal RF no ambiente II.	63
1	Diagrama de Blocos do Instrumento Virtual da fase <i>offline</i> criado no LabVIEW.	78
2	Diagrama de Blocos do Instrumento Virtual da fase <i>online</i> criado no LabVIEW.	79

Lista de Tabelas

5.1	Principais Especificações do Módulo XBee-Pro.	46
5.2	Ajustes realizados na função <i>Sweep</i> do gerador de RF.	49
5.3	Seis primeiras medições para a criação do <i>fingerprint</i> de uma área.	51
6.1	Localizações reais da fonte emuladora de DP e localizações estimadas pelos métodos KNN e WKNN nos testes no ambiente I.	61
6.2	MEE obtido com os testes no ambiente I para os métodos KNN e WKNN.	61
6.3	Localizações reais da fonte emuladora de DP e localizações estimadas pelos métodos KNN e WKNN nos testes no ambiente II.	64
6.4	MEE obtido com os testes no ambiente II para os métodos KNN e WKNN.	64

Lista de Siglas

ADC – *Analogic Digital Converter*
AOA – *Angle of Arrival*
CC – *Corrente Contínua*
CSV – *Comma-Separated Values*
DGA – *Dissolve Gas Analysis*
DOA – *Direction of Arrival*
DP – *Descarga Parcial*
GIS – *Gas Insulated Substation*
HF – *High Frequency*
HFCT – *High Frequency Current Transformer*
HPLC – *High Performance Liquid Chromatography*
IEC – *International Electrotechnical Commission*
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ISM – *Industrial, Scientific and Medical*
Kbps – *Kilobits por segundo*
KNN – *K-Nearest Neighbor*
LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*
LNA – *Low Noise Amplifier*
MAC – *Medium Access Control Layer*
MEE – *Mean Estimation Error*
NWK – *Network Layer*
PD – *Partial Discharge*
PHY – *Physical Layer*
PWM – *Pulse-Width Modulated*
QA – *Quality Assurance*
RF – *Radiofrequência*
RSS – *Received Signal Strength*
RSSF – *Rede de Sensores sem Fio*
SMA – *SubMiniature version A connector*
TDOA – *Time Difference of Arrival*

TOA – *Time of Arrival*

UHF – *Ultra High Frequency*

UV – *Ultravioleta*

UWB – *Ultra Wide Band*

VHF – *Very High Frequency*

VI – *Virtual Instrument*

WKNN – *Weighted K-Nearest Neighbor*

WSN – *Wireless Sensors Network*

Lista de Símbolos

Modelo da Capacitância

C_a – Capacitância do dielétrico sem falhas

C_b – Capacitância nas adjacências da cavidade da falha no dielétrico

C_c – Capacitância da cavidade da falha no dielétrico

i_c – Corrente no capacitor C_c

i_b – Corrente no capacitor C_b

q_c – Carga interna, carga física ou carga real

ΔV_c – Variação de tensão na capacitância C_c

C_{eq} – Capacitância equivalente

q_a – Carga externa

ΔV_a – Variação de tensão na capacitância C_a

$u_p(t)$ – Tensão da rede aplicada ao dielétrico

$u_{10}(t)$ – Parcela da tensão $u_p(t)$ presente na cavidade da falha

u_z – Valor crítico da tensão $u_{10}(t)$ em que se iniciam as descargas

$u_1(t)$ – Tensão na cavidade após a ocorrência de uma DP

$i_p(t)$ – Corrente no circuito equivalente na ocorrência de DP

Modelo de Pedersen

MPa – Megapascal

q_s – Cargas induzidas pelas descargas internas

E_q – Campo elétrico gerado pelas cargas de superfície

σ – Densidade de cargas de superfície

E_{res} – Campo elétrico resultante dentro da cavidade

ΔV – Variação da tensão nos eletrodos

V – Tensão entre os eletrodos

Q – Carga no eletrodo depois que uma descarga ocorre

ΔQ – Carga suprida por uma fonte de tensão

q – Carga aparente

C – Capacitância da isolação
 μ – Momento dipolo
 K_p – Parâmetro que depende da forma da cavidade
 E_l – Campo elétrico abaixo do qual a descarga se encerra
 Ω – Volume da cavidade em mm^3
 B – Constante que expressa as características do gás
 a – Raio da cavidade
 p – Pressão do gás

IEC 60720

$U \sim$ – Fonte de alta tensão alternada
 Z_{mi} – Impedância de entrada do sistema de medição
 CC – Cabo de conexão
 OL – Link óptico
 C_a – Objeto em teste
 C_k – Capacitor de acoplamento
 CD – Dispositivo de acoplamento
 MI – Instrumento de medição
 Z – Filtro

Determinação do TDOA e Estimação da Localização

t_1 – Tempo de chegada (TOA) do sinal no sensor 1 de exemplo
 t_2 – Tempo de chegada do sinal no sensor 2 de exemplo
 Δt_{12} – Diferença do tempo de chegada (TDOA) dos sinais nos sensores 1 e 2
 U – Energia do sinal de DP capturado
 V – Tensão do sinal de DP capturado
 R – Impedância de medição
 $V(t_i)$ – Amostra de V no instante t_i
 N – Número de amostras
 $U(t_k)$ – Energia do sinal amostrado até o tempo t_k
 $T(m)$ – Média do sinal capturado sobre uma janela deslocada no eixo do tempo no método do limiar com janela de tempo médio
 V_i – Amostra do sinal V
 w – Largura da janela de tempo
 f_d – Média da frequência do sinal calculada usando o espectro de frequência de V
 $f(t)$ – Correlação cruzada de duas funções contínuas $g(t)$ e $h(t)$
 $f(n)$ – Correlação cruzada de duas funções discretas $g(n)$ e $h(n)$

-
- c – Velocidade da luz
 t_q – Tempo de chegada do sinal nas antenas
 τ – Instante de tempo desconhecido que ocorre um pulso de DP
 x_s, y_s, z_s – Coordenadas de uma fonte de DP
 x_q, y_q, z_q – Coordenadas das antenas ou nós sensores
 t_{12} – Diferença do tempo de chegada dos sinais nas antenas 1 e 2
 t_{13} – Diferença do tempo de chegada dos sinais nas antenas 1 e 3
 t_{14} – Diferença do tempo de chegada dos sinais nas antenas 1 e 4
 g_q – Distância entre a fonte de DP e as antenas
 P_r – Potência do sinal recebido
 k – Constante que depende dos parâmetros do sistema no método de localização baseado no RSS
 r – Distância entre transmissor e receptor
 n – Índice de perdas de caminho
 P_{r1} – Potência recebida pelo nó sensor 1
 P_{r2} – Potência recebida pelo nó sensor 2
 P_{r3} – Potência recebida pelo nó sensor 3
 P_{r4} – Potência recebida pelo nó sensor 4
 r_1 – Distância entre a fonte de DP e o nó sensor 1
 r_2 – Distância entre a fonte de DP e o nó sensor 2
 r_3 – Distância entre a fonte de DP e o nó sensor 3
 r_4 – Distância entre a fonte de DP e o nó sensor 4
 P_{r1} – Potência recebida pelo nó sensor 1
 P_{r2} – Potência recebida pelo nó sensor 2
 P_{r3} – Potência recebida pelo nó sensor 3
 P_{r4} – Potência recebida pelo nó sensor 4
 r_q – Distância entre a fonte de DP e os sensores q
 ss_{L1} – Vetor com as intensidades dos sinais recebidos por n antenas quando o sinal foi gerado na localização L1 durante o *fingerprinting*
 $ss_{L1,n}$ – Sinal recebido pela n -ésima antena durante o *fingerprinting*
 ss_c – Vetor com as intensidades dos sinais atuais recebidos por n antenas durante a fase *online*
 $ss_{c,n}$ – Sinal atual recebido pela n -ésima antena durante a fase *online*
 $d(ss_c, ss_{L1})$ – Distância Euclidiana da medida atual para cada vetor do banco de dados
 K – Valor que define a quantidade de vizinhos nos métodos do KNN e WKNN
 X_E, Y_E – Coordenadas da localização estimada da fonte de DP
 X_i, Y_i – Coordenadas dos K-vizinhos mais próximos
 D – Parâmetro utilizado no método do WKNN

d_0 – Valor utilizado no cálculo do D para evitar uma divisão por zero

Construção do *Fingerprint*

N_p – Identificador da posição da antena

$X(m), Y(m)$ – Coordenadas para posicionamento da antena

V_1 – Tensão na saída do detector RF do nó 1

V_2 – Tensão na saída do detector RF do nó 2

V_3 – Tensão na saída do detector RF do nó 3

V_4 – Tensão na saída do detector RF do nó 4

Resultados

X_R, Y_R – Coordenadas das localizações reais da fonte emuladora de DP

X_{KNN}, Y_{KNN} – Coordenadas das localizações estimadas pelo método KNN

X_{WKNN}, Y_{WKNN} – Coordenadas das localizações estimadas pelo método KNN

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Aparatos de alta tensão são os mais caros e os mais críticos equipamentos de qualquer sistema de potência. A falha desses equipamentos levam à perdas catastróficas e interrupção indesejada do fornecimento de energia. A maioria dessas falhas estão relacionadas à problemas de isolamento. Dessa forma, para uma operação econômica e confiável, é essencial monitorar a condição do isolamento dos equipamentos e assim evitar falhas [1]. Análises revelam que falhas no isolamento são a causa raiz para mais de 60 % dos danos em equipamentos de alta tensão, assim, é necessário garantir boas condições do isolamento [2]. Ademais, falhas podem causar danos aos equipamentos próximos, insatisfação dos clientes, interrupção da atividade econômica e imposição de multas regulamentares. A gestão efetiva desses ativos de capital é, portanto, um fator chave das companhias de geração, transmissão e distribuição [3].

Foi reconhecido que falhas no isolamento muitas vezes estão relacionadas à ocorrência e severidade de descargas parciais (DP) dentro de vazios e/ou na superfície do isolamento [4], além de outros fatores como o acúmulo de estresses mecânicos, térmicos e elétricos que ocorrem durante um longo tempo de funcionamento do equipamento [1].

Descargas parciais são descargas elétricas em equipamentos de alta tensão que atravessam parcialmente o isolamento [5]. O fenômeno da descarga parcial acelera a degradação local e pode causar o trilhamento elétrico, que é a iminência para uma ruptura total do isolamento. Visto que as descargas parciais são essencialmente avalanches de elétrons, elas dão origem à pulsos de carga elétrica, dos quais produzem distúrbios de corrente e tensão fora do sistema de isolamento [6]. Por conseguinte, é importante que a atividade de DP seja monitorada e tendenciada de modo que uma decisão possa ser tomada baseada no estado do isolamento [7].

Os efeitos físicos mensuráveis das descargas parciais são a emissão de ondas eletromagnéticas, como luz ultravioleta (UV) não visível e visível, onda de radiofrequência,

onda acústica e mudanças repentinas de tensão ou corrente. Outras consequências de descargas sucessivas são mudanças na composição química devido ao aquecimento e outros efeitos, assim, a medição de alterações na composição química é capaz de identificar o equipamento que tenha sido afetado por descargas parciais durante algum tempo, sendo este método *offline* por natureza [1]. O método elétrico, isto é, o registo e processamento de um sinal elétrico induzido num circuito de detecção, é a técnica mais frequentemente utilizada para a detecção e quantificação das magnitudes de descargas parciais [8].

Para garantir que o sistema de isolamento de um equipamento de alta tensão possa suportar com segurança a tensão de serviço e avaliar sua confiabilidade em condições operacionais após um determinado número de anos de funcionamento, técnicas não destrutivas e *online* devem ser usadas para detectar e diagnosticar defeitos, a fim de determinar se uma ação de manutenção preventiva é necessária e, finalmente, para evitar uma falha de operação [9].

Em geral, a maioria dos esquemas de monitoramento contínuo são projetados para equipamentos individuais. Para a viabilidade econômica, o custo do monitoramento de DP deve ser significativamente menor do que o custo de interrupção e os custos de reposição de equipamentos com falha. A justificativa econômica pode ser facilmente verificada através do alto capital de equipamentos de subestação, tais como transformadores e disjuntores. Uma alternativa rentável para contornar esse problema é o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar uma subestação inteira. Um obstáculo para isso, já que a maioria dos métodos de monitoramento de DP são baseados em medições elétricas, é a necessidade de múltiplas conexões nos equipamentos. Essa desvantagem pode ser eliminada com o uso de uma tecnologia de sensoriamento remoto, como a detecção por rádio frequência (RF), acústica ou emissões visíveis/ultravioleta/infravermelha oriundas da DP. Em comparação com as emissões acústicas ou ópticas, a detecção RF é favorável devido às longas distâncias sobre as quais o efeito pode ser detectado [10].

Na detecção radiométrica de DP, em sua forma mais simples, um receptor de rádio direcional pode ser usado para determinar a localização de uma descarga elétrica dentro de uma subestação. Como os pulsos de DP têm geralmente duração abaixo da ordem de micro segundos, eles irradiam transientes de rádio frequência. Provavelmente, a propriedade mais importante dos métodos radiométricos é que eles não requerem contatos com os terminais de alta tensão ou barramentos, somada à não necessidade de interrupção para instalação. Arranjos de antenas para o monitoramento de uma subestação, não necessitam de contato e são não invasivos em sua aplicação para instalações em funcionamento, logo, não apresentam preocupações de segurança para os operadores da planta [11].

As medições de rádio frequência têm sido extensivamente aplicadas em subestações para monitoramento das atividades de DP. Se as medições radiométricas forem ligadas a uma rede de sensores sem fio, um sistema de localização de DP pode ser implementado com baixo custo [12]. O uso de uma rede de sensores sem fio para detecção de DP

elimina a necessidade de cabos para a comunicação dos sensores e reduz o custo total da instalação com o uso de chips RF cada vez mais baratos. Além disso, o monitoramento sem fio proporciona a isolamento galvânica entre o item monitorado e o usuário situado em uma localidade remota [13]. Um sistema de detecção radiométrico de baixo custo para detecção, localização e diagnóstico de DP tem o potencial para ser um componente chave para uma futura rede elétrica inteligente (*smart grid*) [14].

Recentemente, as redes de sensores sem fio têm sido amplamente reconhecidas como uma tecnologia promissora para aprimorar vários aspectos das redes elétricas inteligentes, especialmente aquelas que lidam com geração de energia, fornecimento bidirecional e monitoramento contínuo, oferecendo uma energia eficiente, confiável e uma solução de baixo custo para gerenciamento. As aplicações potenciais e existentes de redes de sensores sem fio para as redes elétricas inteligentes incluem medições avançadas, resposta da demanda e tarifamento dinâmico, diagnóstico de falhas do equipamento, controle de carga, automação da distribuição e monitoramento/controlado remoto do sistema de potência [15].

1.2 Objetivo Geral

Nesta dissertação de mestrado tem-se como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema de detecção e localização de descargas parciais utilizando uma rede de sensores sem fio. Os nós sensores distribuídos dentro do ambiente de monitoramento enviam os dados para um computador, no qual é executado um algoritmo de localização por meio de um instrumento virtual.

1.2.1 Objetivos Específicos

Com a realização deste trabalho, pretende-se:

- Construir múltiplos nós sensores ligados a uma rede sem fio para detecção da intensidade do sinal RF emitido por uma fonte de descarga parcial;
- Desenvolver um instrumento virtual que receba os dados enviados pelos nós sensores através da rede sem fio e que execute um algoritmo capaz de retornar ao usuário a estimativa da localização da descarga parcial.

1.2.2 Organização do Texto

Neste capítulo tem-se uma breve introdução, com a apresentação da motivação e os objetivos a serem alcançados com este trabalho. No Capítulo 2, está apresentada uma breve teoria sobre as descargas parciais. No Capítulo 3, estão apresentados os principais métodos de detecção de descargas parciais encontrados na literatura. No Capítulo 4, estão apresentadas as principais formas de localização de descargas parciais encontradas

na literatura, bem como os métodos do cálculo de localização. No Capítulo 5, estão apresentados quais dispositivos formam um nó sensor para medição e aquisição dos dados, como o sinal de DP foi emulado utilizando um gerador de RF e como funcionam os instrumentos virtuais. No Capítulo 6, estão apresentados os resultados obtidos de testes realizados em dois ambientes. Por fim, no Capítulo 7, tem-se as considerações finais, incluindo as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Teoria de Descargas Parciais

A norma IEC 60270 [16] define a Descarga Parcial (DP) como sendo uma descarga elétrica localizada, que atravessa parcialmente o isolamento entre condutores e que pode ou não ocorrer adjacientemente a estes condutores. A norma ainda faz um complemento a respeito da DP através de três notas:

Nota 1: As descargas parciais são, em geral, uma consequência das concentrações locais de estresse elétrico no isolamento ou na superfície do isolamento. Geralmente, tais descargas aparecem na forma de pulsos com duração muito menor que $1 \mu\text{s}$. Entretanto, formas mais contínuas podem ocorrer, tais como as ditas descargas parciais sem pulsos que ocorrem em dielétricos gasosos. Esse tipo de descarga normalmente não será detectada através dos métodos descritos nessa norma.

Nota 2: “Corona” é uma forma de descarga parcial que ocorre em meios gasosos em torno de condutores que estão distantes de isolamento líquido ou gasoso. “Corona” não deve ser usado como um termo geral para todas as formas de DP.

Nota 3: Descargas Parciais são muitas vezes acompanhadas de emissões de som, luz, calor, e reações químicas.

De outra forma, pode-se dizer que as descargas parciais são falhas dielétricas localizadas em uma pequena parte de um sistema de isolamento elétrico sólido ou líquido sob estresse de alta tensão, que não atravessam o espaço entre dois condutores. A DP é um fenômeno estocástico e não linear. Normalmente ocorre em cavidades dentro dos materiais de isolamento, na superfície ou em torno da superfície de um condutor em alta tensão [17].

A ruptura dielétrica de um gás (por exemplo, o ar), contido em uma cavidade ou submetido a um campo elétrico altamente não uniforme, resultará nas descargas parciais. Se a cavidade estiver preenchida com um sólido orgânico ou líquido, a DP degradará o material orgânico e poderá causar a falha do isolamento elétrico [18]. A DP pode ocorrer

de uma forma que não afetará a tensão de ruptura durante um ensaio em alta tensão. Eventualmente essa descarga causará falhas na maioria dos sistemas, possivelmente anos após o sistema ter sido colocado em operação [19].

As medições de DP são necessárias em ensaios de rotina para demonstrar que os objetos em teste estão livres de DP, na qual poderia causar uma deterioração ou falha durante o funcionamento. Em certos casos os testes de DP são também utilizados para monitorar os isolamentos das instalações, durante o funcionamento, para detectar danos incipientes, que estão na iminência de uma falha [20]. Os fabricantes de cabos de alta tensão, transformadores, capacitores e disjuntores, onde o isolamento é principalmente composto de materiais orgânicos (óleo, papel, polietileno, borrachas, epóxios e/ou poliésteres) devem ter o cuidado de projetar sistemas de isolamento que não contenham espaços vazios em regiões de alto estresse elétrico. A DP também pode ser um sintoma de quando os equipamentos de alta tensão estão submetidos ao calor, estresse mecânico e condições do ambiente. Por exemplo, vazios dentro de isolamentos de mica epóxi e papel em óleo podem advir de operações em altas temperaturas, o que resulta no descolamento de isolamentos adesivos ou gera gases em sistemas contendo óleo. Similarmente, estresses mecânicos pode criar vazios e assim resultar em DP [18].

A seguir estão elencadas algumas razões pelo qual as medições de DP são realizadas [18]:

- **Teste de projeto (*Design Test*):** Para avaliar o projeto de um novo sistema de isolamento, assegurando que a DP seja inexistente (ou abaixo de algum nível especificado) sob operação normal.
- **Teste da garantia de qualidade (QA - *Quality Assurance*):** Para assegurar que não serão introduzidos vazios durante o manufaturamento/processamento do sistema de isolamento.
- **Teste de diagnóstico (*Condition Assessment*):** Determinar se o isolamento elétrico em equipamentos como motores, transformadores, disjuntores e cabos não tenham se deteriorado devido a estresses elétricos, térmicos, mecânicos ou ambientais durante a operação.

O principal objetivo desses testes é garantir que os equipamentos atinjam a vida útil esperada, ou seja, que o equipamento é confiável. Se a DP for detectada, ou se os seus níveis estejam acima dos permitidos, é provável que o sistema de isolamento irá falhar prematuramente.

2.1 Tipos

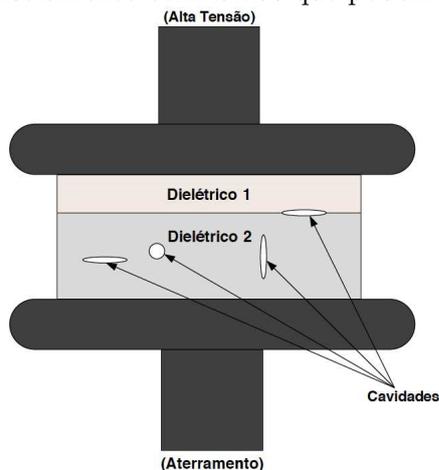
As descargas parciais podem ser divididas em três tipos: descargas internas, descargas superficiais e corona. Essas descargas têm diferentes características e assim afetarão a vida útil da isolação de maneira diferente [20].

2.1.1 Descargas Internas

As descargas internas ocorrem em cavidades ou inclusões dentro do dielétrico. Cavidades com gases podem surgir durante o processo de manufatura do material. Por exemplo, no processo de injeção de materiais poliméricos, as falhas podem ocorrer através da infiltração do ar atmosférico ou gases residuais provenientes de reações químicas [21]. Além disso, as inclusões de gases podem surgir durante o período de funcionamento do sistema de isolação, como consequência de estresse mecânico, ciclos térmicos, sobrecarga ou sobretensão [20].

Devido as menores rigidez e permissividade dielétrica dos gases em relação às dos líquidos ou sólidos, o campo elétrico se intensifica na região da cavidade, causando o aparecimento das descargas internas. Elas podem ocorrer em qualquer parte do dielétrico, como na junção de dois materiais de dielétricos diferentes ou nas regiões adjacentes ao eletrodo [22]. Na Figura 2.1 tem-se um exemplo de sistema de isolamento com dois dielétricos. As cavidades presentes no isolamento estarão suscetíveis ao aparecimento de descargas.

Figura 2.1 Exemplo de isolamento com falhas que podem causar descargas parciais.



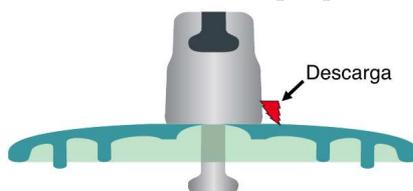
Fonte: [22].

2.1.2 Descargas Superficiais

As descargas superficiais ocorrem na superfície de uma isolação onde o campo elétrico tangencial excede valores críticos, como por exemplo, no invólucro de porcelana ou

de polímero dos equipamentos de alta tensão. Essas descargas ocorrem a partir das bordas do eletrodo paralelas à superfície do dielétrico [23]. A incidência contínua de descargas na superfície do dielétrico cria caminhos condutores na direção do campo elétrico. Esse fenômeno, chamado de trilhamento, pode causar a ruptura completa do dielétrico [21]. As descargas superficiais ocorrem principalmente em buchas, terminações de cabos ou em enrolamentos de geradores [22]. Na Figura 2.2 tem-se a representação de um possível local de ocorrência de descargas superficiais em um isolador elétrico.

Figura 2.2 Exemplo de isolamento com falha que pode causar descargas superficiais.



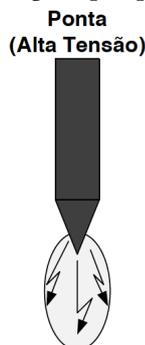
Adaptado de: [22].

2.1.3 Corona

Corona são descargas causadas pela presença de campos elétricos intensos em torno de pontas agudas ou superfície dos eletrodos de alta tensão, ocorrendo normalmente em gases [24]. Quando o campo elétrico ultrapassa o valor de ruptura que circunda a região, originam-se as descargas parciais. Na Figura 2.3 tem-se uma possível configuração de eletrodos capaz de gerar descargas do tipo corona.

Corona no ar gera ozônio, que pode causar fissuras no isolamento polimérico ou elastomérico. Gera também óxidos de nitrogênio, que com vapor d'água, podem corroer metais e formar depósitos condutores, promovendo o fenômeno do trilhamento [20].

Figura 2.3 Exemplo de configuração que pode gerar descargas tipo corona.



Fonte: [22].

2.2 Modelagem

Na literatura encontram-se dois modelos principais para representação das descargas parciais. O modelo da capacitância, também conhecido como modelo de *Gemant & Philippoff* [25] ou modelo a-b-c, representa o isolamento defeituoso através de um circuito elétrico equivalente. O modelo permite determinar de forma aproximada o valor da carga aparente gerada por uma descarga parcial na cavidade. Já o modelo de Pedersen [26], leva em consideração a geometria do defeito e o campo elétrico dentro da falha.

Para estimar a carga transferida no local da DP nos terminais do objeto de teste, a modelagem de DP com base em circuitos equivalentes é uma prática comum. Conforme se sabe, as descargas em cavidades preenchidas com gás dentro de dielétricos sólidos, podem ser consideradas como as mais prejudiciais, porque são a razão para uma deterioração irreversível do isolamento de alta tensão. Assim, os modelos DP existentes referem-se comumente a descargas em cavidades gasosas [27].

2.2.1 Modelo da Capacitância

O modelo capacitivo clássico está representado na Figura 2.4(a). C_a representa a capacitância de toda a parte do dielétrico sem falhas, C_b é a capacitância nas adjacências da cavidade e C_c representa a cavidade em si. O gerador de descargas é representado pelo centelhador em paralelo com C_c . Devido a esses três capacitores, essa representação também é conhecida como modelo a-b-c. A seguir está descrita a demonstração do modelo capacitivo [27].

No caso de uma ruptura, a corrente através do centelhador é composta pela corrente i_c , descarregando a capacitância da cavidade C_c , e a corrente i_b , descarregando a capacitância das adjacências da cavidade C_b (Figura 2.4(b)). A corrente i_b através de C_b também flui através da capacitância do dielétrico C_a . No circuito, é comum distinguir a carga interna da carga externa. A carga interna q_c , também dita ser a carga física ou a carga real, é igual à integral das correntes transitórias i_b e i_c , o que causa uma variação de tensão ΔV_c na capacitância C_c .

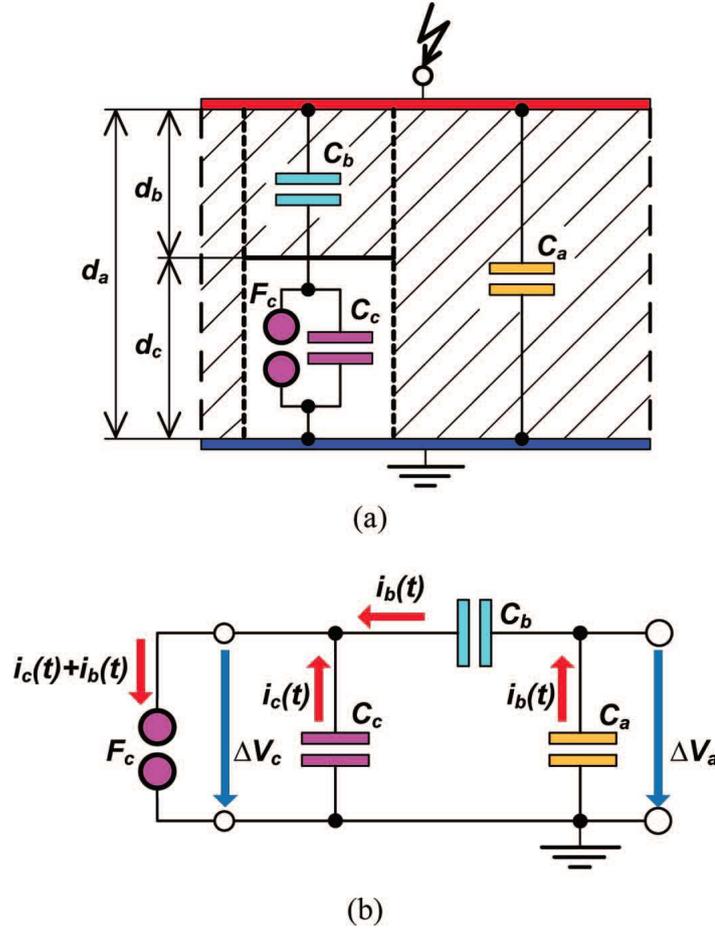
A capacitância equivalente do circuito da Figura 2.4(b) será dada por:

$$C_{eq} = \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} + C_c \quad (2.1)$$

Na condição de que $C_a \gg C_c \gg C_b$, o que geralmente é satisfeita, a capacitância equivalente do circuito pode ser aproximada por:

$$\begin{aligned} C_{eq} &\approx \frac{C_a C_b}{C_a} + C_c \\ C_{eq} &\approx C_b + C_c \end{aligned} \quad (2.2)$$

Figura 2.4 Modelo capacitivo. (a) Circuito equivalente do isolamento com cavidade interna; (b) correntes transitórias fluindo através do circuito equivalente.



Fonte: [27].

Dessa forma, a carga interna pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$q_c \approx \Delta V_c (C_b + C_c) \quad (2.3)$$

A carga externa q_a representa a integral da corrente transitória i_b fluindo através das capacitâncias em série C_b e C_a , o que causará uma variação de tensão ΔV_a calculada por:

$$\Delta V_a = \Delta V_c \frac{C_b}{C_a + C_b} \quad (2.4)$$

Que pode ser aproximada por:

$$\Delta V_a \approx \Delta V_c \frac{C_b}{C_a} \quad (2.5)$$

Nestas condições, a carga externa detectada nos terminais do dielétrico será:

$$q_a \approx \Delta V_a C_a \approx \Delta V_c C_b \quad (2.6)$$

Combinando as Equações (2.3) e (2.6), obtemos:

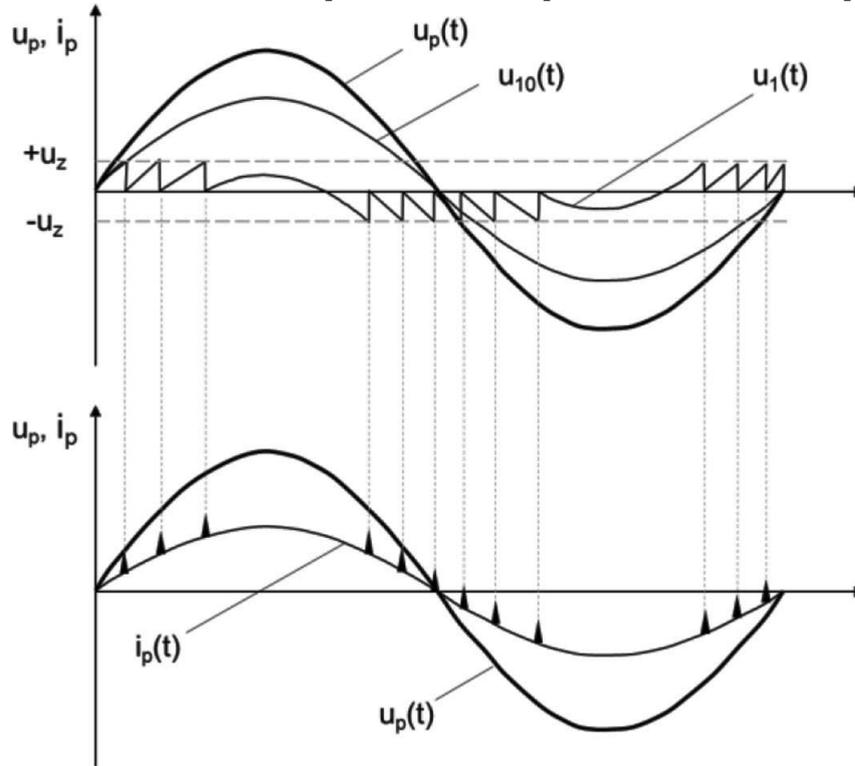
$$q_a = q_c \frac{C_b}{C_b + C_c} \approx q_c \frac{C_b}{C_c} \quad (2.7)$$

Pela condição assumida de que $C_c \gg C_b$, a carga externa detectada nos eletrodos do dielétrico é muito menor do que a carga interna, ou seja:

$$q_a \ll q_c \quad (2.8)$$

Devido a essa não igualdade o termo carga aparente foi introduzido. Na IEC 60270 [16] é colocado que a carga q_a detectada nos terminais do objeto de teste “não é igual à carga envolvida no local da descarga e não pode ser medida diretamente”.

Na Figura 2.5 tem-se as formas de onda da tensão e corrente para o circuito equivalente. A tensão $u_p(t)$ sobre todo o arranjo é provida pela rede, e uma porção desta, $u_{10}(t)$, aparece na cavidade. A magnitude depende do tamanho e da localização da cavidade, ou da capacitância do circuito, que geralmente é desconhecida. Quando a tensão $u_{10}(t)$ na cavidade atinge o valor crítico u_z , e um elétron livre está presente na cavidade, uma descarga elétrica acontece. Como consequência, a tensão $u_1(t)$ na cavidade decai e rapidamente se recupera à medida que a ionização dentro da cavidade é neutralizada, e o processo se repete no semi-ciclo negativo. Assim, para cada ruptura, a corrente $i_p(t)$ flui no circuito equivalente. Essa corrente é medida em relação à tensão $u_p(t)$ para a medição de DP. Baseado na posição, magnitude, tempo e forma dos pulsos de corrente, é possível se ter conclusões a respeito da imperfeição que está causando a DP. Isso possibilita julgar, com algumas limitações, a qualidade do isolamento [28].

Figura 2.5 Tensão e corrente para o circuito equivalente do modelo capacitivo.

Fonte: [28].

A respeito da corrente percebida nos terminais do objeto em teste no momento em que ocorre uma DP, Eigner e Rethmeier [28] também obtiveram a mesma conclusão de Lemke [27]. Como as capacitâncias não são conhecidas, a corrente na conexão externa do circuito é apenas uma fração da descarga na cavidade. Como resultado, a medição de DP é sempre uma medição indireta. Subsequentemente, a medição em picocoulombs (pC) é dita ser a “carga aparente”, que é insuficiente para uma conclusão da gravidade da imperfeição do isolamento.

2.2.2 Modelo de Pedersen

Na década de 80, Pedersen [26] rejeitou o modelo clássico a-b-c (Figura 2.4), afirmando que a cavidade não poderia ser representada por uma capacitância, mas estaria relacionada ao campo elétrico entre os eletrodos. Consequentemente, os transitórios eletromagnéticos detectáveis nos eletrodos, não são causados pelo descarregamento da capacitância de uma cavidade imaginária, mas sim pelo momento do dipolo estabelecido na cavidade como consequência das descargas no gás [27].

Pedersen desenvolveu uma fórmula teórica para o cálculo da carga aparente q_a em uma cavidade com gás interna aos dielétricos. Assume-se no modelo que a cavidade é esférica, preenchida com ar e com pressão interna de 0,1 MPa. A seguir está descrita a demonstração do modelo de Pedersen [29].

Descargas internas induzem cargas q_s positivas e negativas em ambos os lados da superfície da cavidade. As cargas na superfície formam um dipolo, o que resulta em um campo elétrico E_q , Figura 2.6(a). Cargas induzidas também aparecem na superfície de ambos os eletrodos de onde o dielétrico que contém a cavidade se encontra inserido. Quando ocorre uma próxima DP (Figura 2.6(b)), a densidade de cargas de superfície σ formada na superfície aumenta para um limite enquanto que o campo elétrico E dentro da cavidade decai para E_{res} , momento em que as descargas cessam (Figura 2.6(c)). Parte das cargas induzidas na superfície dos eletrodos e parte da carga q_s são liberadas como energia no momento da descarga. Como resultado, a diferença de potencial entre os eletrodos é reduzida pela quantidade ΔV , passando a ser $V - \Delta V$ com a carga do eletrodo sendo $Q + \Delta Q$. Aqui, V e Q denotam respectivamente uma tensão entre os eletrodos e a carga no eletrodo depois que uma descarga ocorre, e ΔQ é a carga suprida por uma fonte de tensão. A carga aparente $q_a = q$ é expressa pelas seguintes equações:

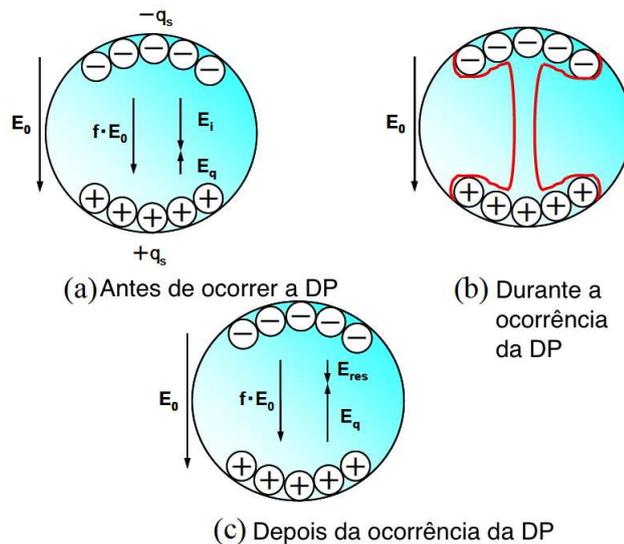
$$q = -\vec{\mu} \cdot \vec{\nabla} \lambda = - \iint_S \lambda \sigma dS = C \Delta V + \Delta Q \approx C \Delta V \quad (2.9)$$

$$q = -K_p \Omega \varepsilon (\vec{E}_i - \vec{E}_l) \cdot \vec{\nabla} \lambda_0 \quad (2.10)$$

$$E_i - E_l = \frac{B E_l}{\sqrt{2ap}} \quad (2.11)$$

onde C é a capacitância do sistema de isolamento, μ é o momento dipolo quando a carga induzida é distribuída na superfície da cavidade, K_p é um parâmetro que depende da forma da cavidade, Ω é o volume da cavidade (mm^3), E_l é um campo elétrico abaixo do qual a descarga se encerra, ou seja, é o campo elétrico crítico no qual o crescimento de ionização cessa, B é uma constante que expressa as características do gás ($(\text{Pa}/\text{m})^{1/2}$), a é o raio da cavidade e p é a pressão do gás (Pa).

Figura 2.6 Disposição das cargas na superfície da cavidade antes e depois da DP, e os campos elétricos associados.



Adaptado de [29].

2.3 Conclusões

Foram descritos neste capítulo os tipos de descargas parciais e duas formas de modelagem dessas descargas. No próximo capítulo são discutidos os principais métodos utilizados para a detecção de DP, de forma a verificar se o fenômeno está em níveis que possam trazer riscos à isolação do equipamento.

Capítulo 3

Detecção de Descargas Parciais

Existem diferentes métodos para detecção das descargas parciais. Quanto ao estado do equipamento durante os testes (se estão ou não em plena operação), o método de detecção pode ser dividido entre *online* e *offline*. Nos métodos *offline*, o equipamento em teste é retirado de sua operação e energizado por uma fonte de tensão externa. Os testes *online* são realizados na tensão de operação, logo, o comportamento da DP pode ser obtido e avaliado [2]. O monitoramento da isolamento é a aplicação contínua de técnicas de medição *online*, na qual permite a análise de tendência e detecção de uma falta iminente através da avaliação automática dos dados [30]. O que dificulta a medição *online* e *on-site* é a interferência, visto que o objeto em teste está conectado ou próximo ao sistema de potência. As interferências elétricas podem vir das descargas corona presentes nas linhas de transmissão e distribuição, operação de ferramentas elétricas, soldagem a arco elétrico, mau contato elétrico, precipitador eletrostático, etc., os quais produzem faíscas/descargas que criam pulsos de correntes similares à DP. Separar o ruído da DP do objeto em teste é importante, pois, se a DP for confundida com o ruído, ocorrerá uma falsa indicação da deterioração da isolamento, o que reduz a utilidade e credibilidade do teste de DP [18].

No que se refere ao princípio físico utilizado para detecção da DP, as técnicas se dividem entre acústicas, ópticas, químicas e elétricas [31, 32]. As medições elétricas ainda podem ser subdivididas entre o método proposto pela IEC 60270, o método que utiliza transformadores de corrente de alta frequência (HFCT - *High Frequency Current Transformer*), o que utiliza a bobina de Rogowski e o da radiofrequência.

Os métodos de detecção podem ainda ser classificados quanto ao posicionamento do elemento sensor, podendo ser invasivos ou não invasivos. Os métodos invasivos têm a desvantagem de exigir o desligamento, remoção e desmontagem do equipamento, ou ainda fazem uso de uma metodologia que faz análise de tensões de entrada e saída, o que expõe os operadores dos sistemas de diagnóstico a elevados níveis de tensão. No contrário, os métodos não invasivos permitem que o equipamento seja analisado em pleno funcionamento, sem a necessidade de desmontagem para estudo de possíveis defeitos [33].

A seguir, tem-se uma breve descrição dos métodos para detecção de DP, de acordo com o princípio físico que o método faz proveito.

3.1 Detecção Elétrica

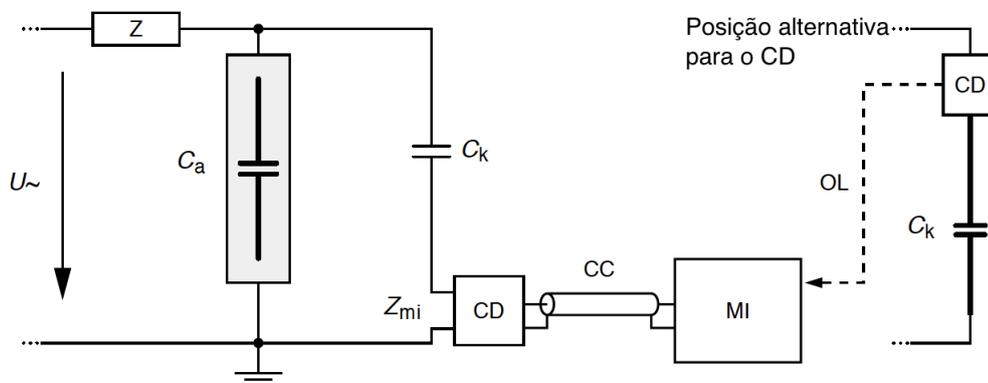
A detecção elétrica pode ser subdividida em alguns métodos. Um deles é o proposto pela IEC 60270, no qual utiliza um capacitor de acoplamento e instrumentos de medição. Na detecção com HFCT, transformadores de corrente de alta frequência são fixados nos condutores de terra para detectar os pulsos de corrente provenientes da DP. Com funcionamento similar ao HFCT, a bobina de Rogowski também pode ser utilizada para detecção dos pulsos de correntes originados pela DP. Já no método da radiofrequência, é realizada a detecção da radiação em alta frequência gerados pelos pulsos de DP.

3.1.1 Método baseado na IEC 60270

A IEC 60270 normatiza a medição da carga aparente de um pulso de DP. É um método de contato, que dessa forma requer a conexão elétrica ao objeto de teste. A medição pela IEC quantifica a integral no tempo da corrente de DP [34]. Uma das limitações do método da IEC 60270 é a sua susceptibilidade à interferência eletromagnética, e, por isso, normalmente fica restrita a trabalhos de detecção *offline*. O método seja talvez melhor aplicado em rotinas de testes para novos equipamentos ou rotinas de testes de pré-comissionamento [35].

A norma IEC apresenta algumas configurações para medição de DP. Dentre elas, a mais utilizada é a que está representada na Figura 3.1 [22].

Figura 3.1 Representação do arranjo experimental empregado na medição de descargas parciais.



Adaptado de [16].

Os componentes representados no circuito da Figura 3.1 são:

$U \sim$: Fonte de alta tensão alternada

Z_{mi} : Impedância de entrada do sistema de medição

CC : Cabo de conexão

OL : Link óptico

C_a : Objeto em teste

C_k : Capacitor de acoplamento

CD : Dispositivo de acoplamento

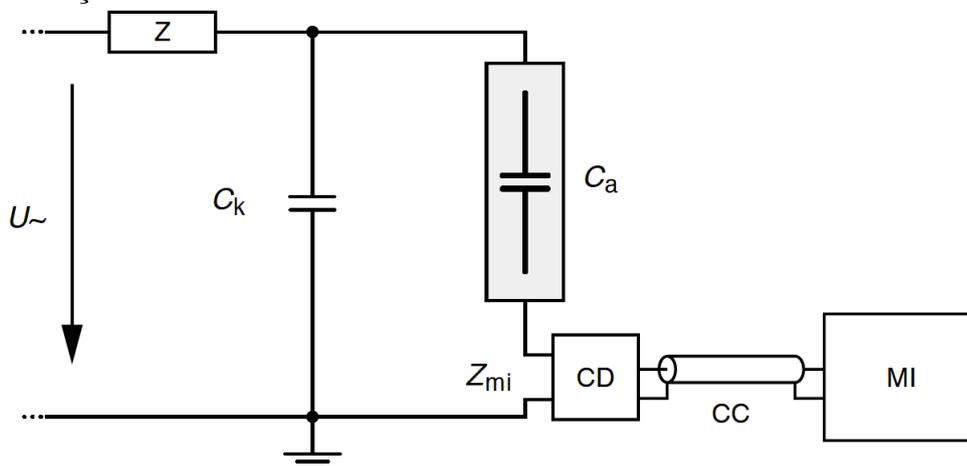
MI : Instrumento de medição

Z : Filtro

O objeto em teste, é normalmente considerado como sendo um capacitor C_a . O capacitor de acoplamento C_k , deve ter um baixo nível de DP na tensão de teste especificada, para que não interfira na medição de DP do objeto em teste. Um alto nível de DP pode ser tolerado caso o sistema de medição seja capaz de distinguir as descargas do objeto em teste e do capacitor de acoplamento, medindo-as separadamente. O filtro Z pode ser adicionado para reduzir ruídos da fonte de tensão. O dispositivo de acoplamento CD , converte a entrada em corrente para uma saída em tensão. Os sinais são transmitidos para o instrumento de medição através de um sistema de transmissão. O instrumento de medição pode ser um osciloscópio com alta taxa de aquisição.

Outra configuração baseada no circuito da Figura 3.1 está representada na Figura 3.2. Nessa configuração, o objeto em teste está em série com o dispositivo de acoplamento. A desvantagem, é que o instrumento de medição pode ser danificado caso ocorra a ruptura do isolamento do objeto em teste, conduzindo a alta tensão aos terminais do instrumento de medição [22].

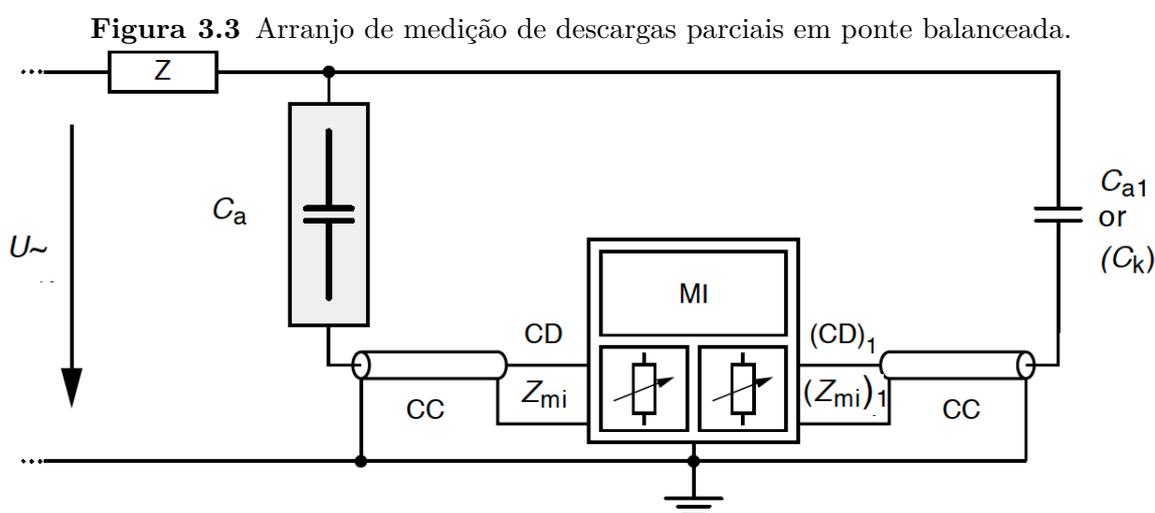
Figura 3.2 Arranjo de medição de descargas parciais com corpo de prova em série com impedância de medição.



Fonte: [16].

O arranjo da Figura 3.3 compreende um circuito balanceado, em que o instrumento de medição é conectado entre dois dispositivos acopladores. O circuito, no qual é baseado na rejeição em modo comum das correntes através de C_a e C_{a1} , amplifica as correntes oriundas da DP no objeto em teste e elimina as perturbações externas.

Para cada um dos circuitos das Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, o dispositivo de acoplamento pode ser posicionado no lado do terminal de alta tensão, de forma que as posições do dispositivo de acoplamento são trocadas com C_a ou C_k . Isso pode ser feito desde que sejam usados *links* ópticos, como indicado no arranjo da Figura 3.1, para a interconexão do dispositivo de acoplamento com o instrumento de medição.

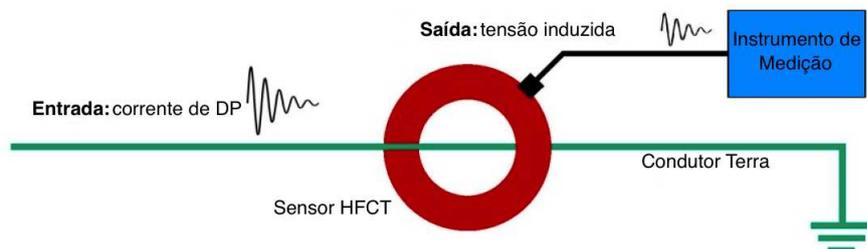


Fonte: [16].

3.1.2 HFCT - *High Frequency Current Transformer*

Os transformadores de corrente de alta frequência (HFCT) são projetados para medição de correntes com alta largura de banda. Para aplicações em DP, o HFCT é usado para medir pulsos rápidos de corrente com tempo de subida na ordem de nanosegundos e duração de até 1000 ns [36]. O sensor baseado no HFCT consiste em uma bobina de indução com um núcleo ferromagnético adequado para a medição de sinais transientes como DP ou interferências de ruído em forma de pulso. Em geral, quando as medições de DP *online* são realizadas em instalações de alta tensão, os sensores HFCT são fixados nos condutores de terra da rede de aterramento. Nesse caso, o sensor pode ser modelado como um sistema em que a entrada é a corrente dos impulsos de DP e a saída é a tensão induzida que é medida sobre a impedância de entrada do instrumento, Figura 3.4. O funcionamento do sensor obedece à lei de Faraday [37]. O HFCT muitas vezes é construído em núcleo dividido, sendo não invasivo e instalado facilmente ao redor dos condutores. É ideal para modernização de instalações antigas [38].

Figura 3.4 Representação do sensor HFCT posicionado num condutor de terra para medição de DP.

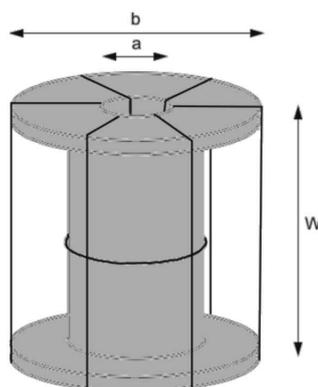


Adaptado de [37].

3.1.3 Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski é um transformador de corrente com um núcleo toroidal preenchido com ar e que opera com base nas leis de Ampère e Faraday-Lenz para detecção de campos magnéticos alternados ou com rápidas variações produzidos pelos pulsos de corrente que atravessam o núcleo de ar da bobina [39]. As bobinas de Rogowski podem ser adequadas para detecção de DP devido aos seguintes recursos: não saturação devido ao núcleo de ar; boa linearidade, devido à ausência de materiais magnéticos; circuito simples e de baixo custo; e não invasiva [40]. O dispositivo representa então uma alternativa ao HFCT. Entretanto, uma desvantagem é que a bobina de Rogowski requer um integrador pelo fato de que a tensão de saída é proporcional à derivada da corrente [39]. A Figura 3.5 tem uma representação de uma bobina de Rogowski construída a partir dos parâmetros geométricos a , b e w .

Figura 3.5 Representação de uma bobina de Rogowski construída a partir dos parâmetros a , b e w .



Fonte: [39].

3.1.4 Radiofrequência (RF)

A corrente no local da DP tem um tempo de subida na ordem de nanossegundos e, devido à rápida aceleração da carga, dá origem a ondas eletromagnéticas com espectros

de energia que se estendem à frequências de 200 MHz e acima [41]. No caso dos transformadores, devido à atenuação moderada na propagação das ondas UHF (*Ultra High Frequency*) dentro do tanque, a detecção de ondas eletromagnéticas torna-se possível [42].

Na detecção de pulsos de DP por métodos eletromagnéticos, distinguem-se duas técnicas, as que aplicam o método convencional baseado na norma IEC 60270 [16], na qual os impulsos de DP são medidos em uma faixa de frequência abaixo de 1 MHz, e aqueles que implementam métodos não convencionais com base na utilização de sensores, cuja medição ocorre nas faixas de frequência HF (*High Frequency*) entre 3 e 30 MHz, VHF (*Very High Frequency*) entre 30 e 300 MHz e UHF entre 300 MHz e 3 GHz [37]. A norma IEC 62478 [43], publicada em 2016, padroniza as medidas eletromagnéticas (HF/VHF/UHF) e acústicas das descargas parciais.

A seguir estão algumas das vantagens expostas por Álvarez *et al.* [37], que são obtidas quando as medições de DP são realizadas com sensores UHF:

- Alta imunidade ao ruído elétrico, interferências e descargas corona, visto que o espectro de frequência destes sinais na faixa de UHF é baixo e em alguns casos insignificante.
- Alta sensibilidade na detecção de DP dentro de compartimentos blindados de subestações isoladas à gás (GIS - *Gas Insulated Substations*), disjuntores dentro de caixas metálicas e tanques de transformadores, devido à ressonância elétrica interna, baixas perdas inerentes e baixos níveis de ruído;
- Possibilidade de localização da fonte de DP. No caso da GIS e dos transformadores, a localização é realizada utilizando-se vários sensores.
- Possibilidade de distinção entre defeitos internos ou externos ao equipamento de alta tensão considerado.

Devido às suas características construtivas, a GIS apresenta maior facilidade na instalação dos sensores UHF, o que acontece de forma diferente nos transformadores. Isso pode ser resolvido de forma fácil e sem grandes custos no momento da fabricação do equipamento. As principais opções de sensores são descritas a seguir [44]:

Sensores janela: O sensor janela se localiza externo ao tanque e pode ser instalado ou removido enquanto a unidade está em funcionamento, sem comprometer a integridade da vedação. Exemplo na Figura 3.6;

Sensores sonda: Em algumas válvulas de óleo, há a possibilidade de inserção de uma sonda com sensor UHF. Ideal para equipamentos antigos (processo de *retrofitting*), onde a medição de outra forma pode estar dificultada. Entretanto, é improvável que se tenham 3 ou 4 válvulas adequadamente distribuídas, de forma que se possa

executar o processo de localização de DP eficazmente. Exemplo de sondas com sensores UHF para inserção nas válvulas de óleo podem ser visualizadas na Figura 3.7;

Sensores internos: Muitas aplicações de monitoramento com UHF em GIS usam sensores que são manufaturados e instalados pelo fabricante do equipamento. Dado que os equipamentos da GIS devem ser projetados para terem pouca manutenção e longa vida, é aceitável que os sensores UHF possam ser instalados permanentemente nos tanques dos transformadores de potência. Na Figura 3.8 tem-se um exemplo desse tipo de sensor.

Figura 3.6 Fotografia de um sensor janela instalado para detectar DP durante os testes no transformador.



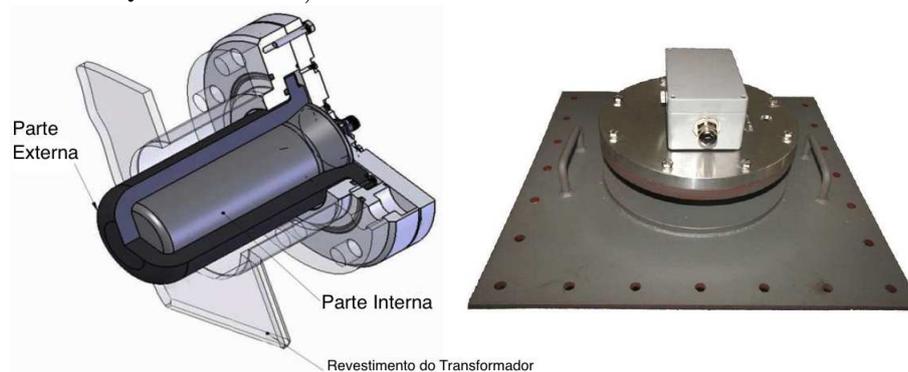
Fonte: [44].

Figura 3.7 Fotografia de uma sonda típica com sensor UHF para inserção através das válvulas de óleo.



Fonte: [44].

Figura 3.8 Duas visões de um sensor UHF interno patentado, para transformadores de potência (Fabricante: Qualitrol DMS).



Fonte: [44].

Visto que o método de detecção por radiofrequência é uma técnica recente, ainda não ganhou grande aceitação de sua capacidade de quantificação da DP. Isso ocorre pelo fato de a técnica responder à taxa de variação do pulso de corrente, ao invés da sua integral e, portanto, não é possível quantificar a magnitude da DP em termos de pC [41].

Uma outra forma de detectar-se a DP também por meio da radiofrequência, é o método de detecção por radiômetros, podendo ser chamado também de medição radiométrica no espaço livre. Nessa medição, uma antena banda larga mede a energia RF emitida pela aceleração da carga que compreende o transiente de corrente da DP. O sinal RF é tipicamente proporcional a derivada do tempo da corrente [34].

A vantagem desse tipo de detecção sem fio sobre os outros métodos eletromagnéticos, é que não é necessário se ter um contato físico com os equipamentos de alta tensão. Desse modo, a instalação do equipamento de detecção não requer que nenhum item da planta seja retirado de operação [45]. Entretanto, como desvantagem, um sistema de detecção no espaço livre por RF tem menor facilidade de calibração em relação aos outros métodos [46].

Com relação à quantificação do valor absoluto de DP em termos de carga aparente em pC, Jaber *et al.* [34] também faz uma observação similar a de Reid *et al.* [41], afirmando que a medição do valor absoluto da intensidade de DP é difícil, se não impossível. Isso acontece devido à amplitude do sinal recebido depender de vários fatores em que suas dimensões são desconhecidas e que em pelo menos em um caso é praticamente irreconhecível. Em ordem crescente de dificuldade para estabelecer, esses fatores desconhecidos incluem: (i) perdas de percurso entre a estrutura radiante e a antena receptora, (ii) a polarização do campo irradiado na direção da antena receptora, (iii) o ganho da estrutura radiante na direção da antena receptora e (iv) a potência irradiada.

3.2 Detecção Acústica

A detecção acústica de DP se baseia na detecção da onda de energia mecânica que se propaga no isolamento a partir do local da descarga [31]. A pressão gerada pela onda pode ser detectada por microfones, transdutores piezoelétricos e até acelerômetros [35]. Algumas das vantagens desse método é a imunidade ao ruído eletromagnético, não destrutivo e não invasivo, tem largo espectro de frequência e mais rentável quando comparado a outros sensores. Entretanto, as desvantagens são a atenuação do sinal, a sensibilidade da medição é afetada pela temperatura, não se pode detectar o nível de DP, complexidade na calibração e capacidade limitada quando utilizado com equipamentos de isolamento a ar [2]. Ainda segundo Kemp [31], outro fator que dificulta esse tipo de medição é a impedância acústica entre a fonte de DP e o detector que pode ser extremamente complexa. A onda acústica é distorcida por uma variedade de fatores, incluindo a divisão entre múltiplas vias, efeitos de velocidade dependentes da frequência e perdas de transmissão entre diferentes meios e suas interfaces.

Similarmente à detecção com UHF, é possível estimar a localização da DP com a instalação de múltiplos sensores. Geralmente utiliza-se o método da diferença do tempo de chegada (TDOA - *Time Difference of Arrival*), onde a diferença do tempo de chegada dos sinais acústicos até os sensores são gravados. Através da resolução de equações não lineares indicando-se essas diferenças de tempo, a localização da DP é estimada [47].

3.3 Detecção Óptica

A detecção óptica de DP pode ser dividida entre dois métodos fundamentais, o óptico direto e o opto-acústico. No método óptico direto faz-se a detecção visual dos sinais produzidos pelo pulso de DP. Já no opto-acústico, verifica-se os efeitos ópticos e acústicos gerados por uma DP [48]. A detecção opto-acústica baseia-se no princípio de que a onda acústica, ao incidir sobre o cabo de fibra óptica, provocará a deformação da estrutura da fibra. Por sua vez, isto resultará numa alteração do seu índice de refração e comprimento da fibra. A onda de luz é, portanto, modulada pela onda acústica e esta pode ser extraída com um demodulador adequado [31].

3.4 Detecção Química

A detecção química pode ser executada pela cromatografia líquida de alta performance (HPLC - *High Performance Liquid Chromatography*) ou pela análise de gases dissolvidos (DGA - *Dissolve Gas Analysis*). No teste de DGA, o óleo do tanque de um transformador refrigerado a óleo ou um material isolante de uma subestação isolada a gás (GIS), é amostrado e analisado para quantificar os diferentes níveis de gases como me-

tano, acetilenos, dióxido de carbono, etileno e hidrogênio. Estes níveis não devem exceder os que foram especificados para a condição de ruptura do isolamento a óleo ou de outro material. O teste de HPLC mede os subprodutos gerados pelos pulsos de DP [32].

As vantagens da detecção química são a imunidade à interferência elétrica [49] e no caso do DGA, o baixo custo [31]. Entretanto, a medição é *offline*, pode levar muito tempo [35] e não se pode ter conclusões a respeito do funcionamento do equipamento, como também não é possível indicar a natureza, intensidade, extensão ou localização de uma única DP [50].

3.5 Conclusões

A atividade de descargas parciais pode ser detectada através dos métodos descritos neste capítulo. Os métodos de detecção elétrica podem ainda ser subdivididos entre o método da IEC 60270, HFCT, bobina de Rogowski ou RF. Se a detecção por RF for implementada em múltiplos sensores, técnicas de localização podem ser aplicadas para localização da fonte de DP. O mesmo pode ser feito com a detecção acústica. Os métodos de localização de descargas parciais são explorados no próximo capítulo.

Capítulo 4

Localização de Descargas Parciais

Na literatura, em busca por trabalhos referentes aos métodos de localização de descargas parciais, percebe-se que a maioria estão relacionados à localização de descargas internas em transformadores de potência. Isso se deve ao fato de que os transformadores são fundamentais para o funcionamento dos sistemas de potência e ainda correspondem à maior parcela dos ativos desses sistemas. Verifica-se também, que a maioria dos sistemas de localização propostos, funcionam a partir da detecção de DP por RF e emissão acústica, ou ainda, para o caso da localização interna de DP em transformadores, a combinação destes dois métodos [51–53]. Para ter um melhor detalhamento da atividade de DP em um transformador, alguns trabalhos propõem a combinação do método acústico com o método elétrico da IEC 60270 [54].

No tocante à abrangência do sistema de localização de DP dos trabalhos pesquisados, eles são utilizados para monitoramento de um único equipamento, como por exemplo um transformador de potência, ou podem abranger uma área inteira, como uma subestação ou linha de transmissão. Para o caso de localização em um equipamento, os métodos aplicados em sua maioria são RF [44, 55–57] ou emissão acústica [47, 58]. Já para localização em uma área, o mais comum é o RF, visto que a radiação eletromagnética resultante da DP pode ser detectada por antenas distribuídas no local [11, 14, 59].

4.1 Localização em Transformadores de Potência

Para a localização de DP em transformadores de potência, as pesquisas se concentram em medições na faixa de UHF e os sensores podem ser instalados nos transformadores conforme discutido na Subseção 3.1.4. O método de localização por UHF é baseado na comparação das diferenças do tempo de chegada das ondas eletromagnéticas, irradiada a partir da fonte de DP, para os vários sensores (ou antenas) instalados no transformador [56]. É necessário um arranjo com três ou mais sensores para se obter simultaneamente o sinal de DP e permitir a triangulação [60]. A triangulação é baseada na geometria e

funciona tanto com o tempo de chegada (TOA - *Time of Arrival*) ou com a diferença de tempo de chegada (TDOA) dos sinais para os diferentes sensores. Para o TOA, é necessário que as antenas e a fonte geradora do sinal tenham a mesma referência de tempo, o que é inviável em um cenário onde a ocorrência de descargas parciais é aleatória. O TDOA necessita apenas da diferença de tempo entre os sinais recebidos em cada par de sensores, sendo assim a técnica mais adequada [61].

Os sensores devem ser posicionados distantes um dos outros para aumentar a possibilidade de obter uma diferença significativa entre os tempos de chegada do sinal. Isso ajudará a reduzir a incerteza da medição e assim, melhorar a precisão da triangulação. Se consideramos um conjunto arbitrário de sensores de DP instalados em locais diferentes em um tanque de transformador, as ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte de DP se propagam no tanque do transformador e chegam a esses sensores em diferentes instantes. Denotando t_1 como sendo o tempo de chegada (TOA) do sinal no sensor 1 e t_2 o TOA no sensor 2, a diferença do tempo de chegada do sinal (TDOA) entre os sensores 1 e 2 é então definida como [60]:

$$\Delta t_{12} = t_1 - t_2 \quad (4.1)$$

As partes ativas do transformador, como o núcleo, enrolamentos e etc influenciam na propagação das ondas eletromagnéticas dentro do tanque e conseqüentemente afetam o tempo de chegada do sinal. Dada uma posição para as antenas, cada local onde ocorre uma DP no transformador terá uma determinada característica para o tempo de chegada. Quanto mais discriminativas forem estas características, mais precisa será a localização do defeito. Um método para determinar as melhores posições para instalação das antenas no transformador, com o propósito de obter uma localização mais precisa do defeito, já foi desenvolvido [57], assim como um algoritmo para determinar as melhores posições para instalação das antenas de forma a melhorar a precisão da localização [56]. Um novo modelo de antena para ser instalada nas válvulas de óleo dos radiadores de ventilação, de forma a contornar o problema das restritas posições para instalação das antenas, também já foi proposto [56].

Como alternativa aos métodos de triangulação utilizando o TDOA, um método de localização de DP em transformadores utilizando a técnica da direção de chegada do sinal (DOA - *Direction of Arrival*), também chamada de ângulo de chegada (AOA - *Angle of Arrival*), já foi proposto [62]. Para aplicação do DOA, é necessário um arranjo de sensores, que no caso do trabalho citado, utilizam-se quatro elementos sensores distribuídos em uma matriz 2x2.

De forma similar aos métodos de localização que fazem proveito da radiação eletromagnética emitida na fonte de DP, é possível realizar a localização utilizando-se a detecção por sensores acústicos, onde os sinais acústicos alcançam os sensores em tempos de che-

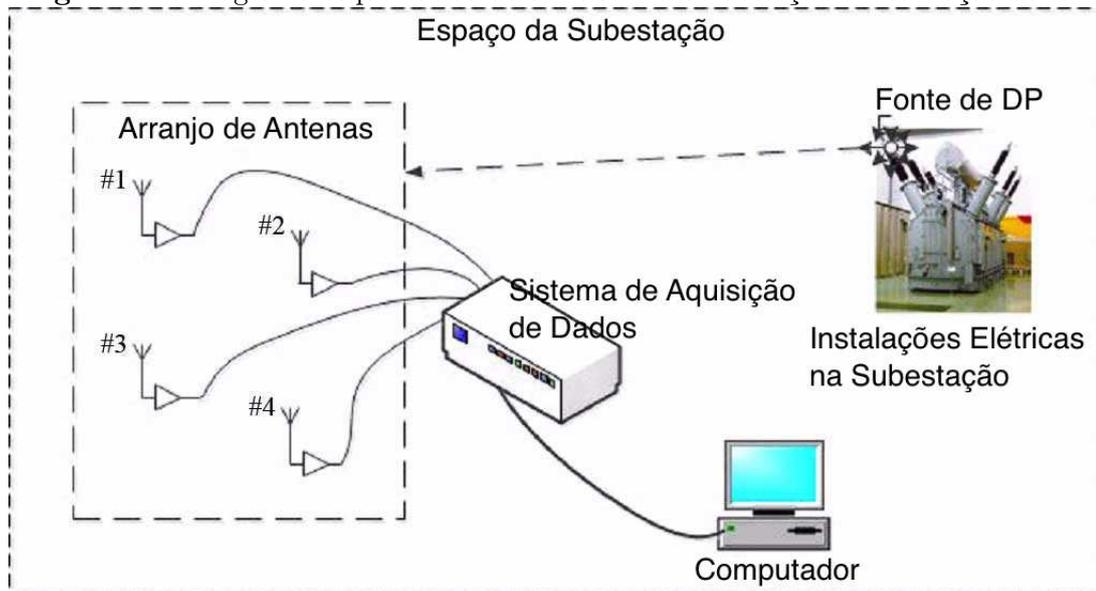
gada particulares. Na localização por emissão acústica, o TDOA também é amplamente utilizado, uma vez que não é necessário conhecer o tempo de chegada nos sensores, mas sim a diferença do tempo [58].

Combinações entre métodos de detecção de DP para fins de localização também foram encontrados. Coenen e Tenbohlen [51] e Hoek *et al.* [52] apresentam métodos para localização que combinam os métodos de emissão acústica e UHF. Utilizando a mesma combinação, Li *et al.* [53] apresentam um único elemento que contém um arranjo de sensores acústicos e UHF para localização com o método do DOA. Predl *et al.* [63] apresentam testes realizados utilizando a medição proposta pela IEC 60270 ou a medição por UHF, para se determinar o instante de tempo em que o sinal teve início, e, dessa forma, determinar o TOA do sinal até os sensores acústicos, estimando-se por fim a localização da descarga. Sikorski *et al.* [54] combinam um sistema de localização com sensores acústicos com a medição da IEC 60270, para se ter uma maior riqueza de informações das atividades de DP no transformador. Existem também pesquisas para localização de DP em partes mais específicas do transformador, como em enrolamentos [64] e buchas [65].

4.2 Localização no Espaço Livre

As técnicas pesquisadas para localização de descargas parciais no espaço livre utilizam as medições de RF do sinal de DP e são aplicadas principalmente em subestações. O princípio utilizado é o mesmo da localização de DP nos transformadores, onde a partir do TDOA, estima-se a localização da DP. Técnicas que se apropriam da intensidade do sinal recebido (RSS - *Received Signal Strength*) pelas antenas também são aplicadas.

A localização em três dimensões de uma fonte de DP requer pelo menos 4 antenas espacialmente separadas com as coordenadas de cada antena conhecidas, dentro de um quadro de referência fixo [66]. O sistema representado pela Figura 4.1 é composto por um arranjo de antenas com amplificadores, um módulo de aquisição de dados de alta velocidade e uma unidade de análise de sinais [67]. O arranjo de antenas formado por quatro antenas omnidirecionais é aplicado para recepção dos sinais irradiados por DP a partir dos equipamentos de potência da subestação. Em seguida, os sinais UHF recebidos pelas antenas são amplificados e enviados por cabos coaxiais. Um osciloscópio de alta velocidade com função de armazenamento ou um computador industrial equipado com cartão de aquisição de dados de alta velocidade, pode ser usado como um sistema de aquisição dos sinais para obter e armazenar de forma síncrona os dados dos quatro canais de sinais UHF. Por fim, o computador calcula as diferenças de tempo dos sinais e resolve equações para determinar a localização da DP na subestação. Simulações e experimentos também já foram realizados para se determinar a forma mais adequada para se distribuir as antenas na subestação e diminuir o erro de localização, distribuindo-se as antenas em forma de quadrado, estrela e trapezoide [61].

Figura 4.1 Diagrama esquemático de um sistema de detecção e localização de DP.

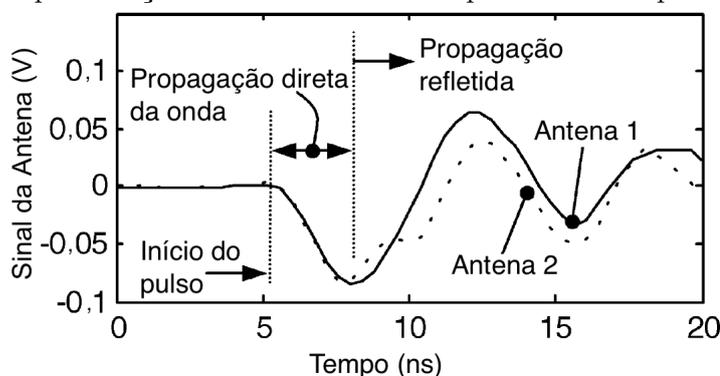
Adaptado de [67].

Foi constatado que os métodos de localização de DP dos quais utilizam o tempo de chegada do sinal (TOA), diferença do tempo de chegada (TDOA) e ângulo de chegada (AOA), apesar de amplamente utilizados, têm maior custo e complexidade nas suas aplicações [68, 69]. Assim, os pesquisadores realizaram estudos para localização de DP baseada no *Fingerprinting* da intensidade dos sinais. O processo ocorre em duas fases: a fase *offline* ou de treinamento e a fase *online* ou de estimação. Na fase *offline*, o objetivo é construir um banco de dados (mapa de rádio ou *fingerprint*) que armazena as intensidades dos sinais (RSS) percebidas nos receptores posicionados em pontos de referência. Na fase *online*, a localização da fonte de DP é estimada pela comparação da intensidade do sinal obtida em tempo real com o banco de dados. Para o cálculo da localização aplicam-se algumas técnicas, como por exemplo, o método dos K-vizinhos mais próximos (*K-Nearest Neighbour*) [68] e outros métodos com redes neurais [68, 69].

Os pesquisadores Philip Moore, Iliana Portugués e Ian Glover, através da publicação intitulada “*Radiometric Location of Partial Discharge Sources on Energized High-Voltage Plant*” [59], passaram a denominar a detecção de DP baseada na energia irradiada a partir do local da descarga, de detecção radiométrica. A maioria das medições radiométricas têm sido feitas na banda estreita, por meio da conversão para uma frequência menor. Com o desenvolvimento da tecnologia de amostragem digital, tornou-se possível o armazenamento das radiações de DP utilizando uma resolução que antes não era possível. No mesmo trabalho, os autores analisam que, para fins de localização, a porção inicial da forma de onda pode ser usada. Devido às reflexões, o sinal se propaga em múltiplos caminhos, e, como consequência, o sinal medido na antena será a soma do sinal obtido pelo caminho direto entre a fonte de DP e a antena, com os múltiplos sinais refletidos.

Portanto, a parte inicial da frente de onda que representa o caminho do sinal a partir da fonte, antes que ocorra qualquer reflexão, é suficiente para a localização. Na Figura 4.2, verificam-se as ondas de propagação direta e refletidas dos sinais de DP obtidos de duas antenas. O trabalho também analisa a precisão da localização a partir da configuração das antenas, sendo elas distribuídas em quadrado e na forma de Y. O *hardware* para captação dos sinais consiste de antenas do tipo *diskcone*, um osciloscópio e um computador. A antena *diskcone* utilizada é constituída de dois cones e um plano de terra. É de banda larga, omnidirecional e possui uma resposta em frequência ao campo elétrico vertical relativamente constante na faixa de 0,1 - 1 GHz.

Figura 4.2 Representação da frente de onda de pulsos obtidos por duas antenas.



Adaptado de [59].

No intuito de criar um sistema de detecção e localização radiométrica de baixo custo, os autores J. M. R. de Souza Neto e Ian Glover, juntamente com outros pesquisadores, depositaram algumas contribuições, tal como o desenvolvimento inicial de um sistema de localização [70], utilizando uma antena *diskcone* projetada para operar na faixa de 200 - 1000 MHz. A DP foi gerada a partir de uma célula com um par de eletrodos, sendo um deles conectado a uma tensão de 10 kV. O sinal obtido da antena é colocado em um filtro passa alta com frequência de corte de 40 MHz e em seguida é aplicado à entrada de um detector de RF. A saída do detector é então aplicada à entrada do conversor analógico-digital de um microcontrolador, para depois ser transmitida para uma estação base através de uma conexão sem fio baseada no protocolo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.15.4. Utiliza-se também emulador de DP para calibração automática do sistema radiométrico, proposto pelos mesmos autores [45]. O objetivo do emulador é auxiliar na calibração dos índices das perdas de transmissão. Um sinal similar de DP é gerado por circuitos eletrônicos e então transmitido, eliminando assim a necessidade da geração de DP com alta tensão. Outra forma de emulação de DP para o sistema de auto calibração foi descrito [71], onde os pulsos são gerados por meio de um diodo de recuperação em degrau (*Step Recovery Diode* - SRD). Para redução da taxa de amostragem do sistema de detecção radiométrico, o mesmo autor utiliza em outro trabalho [72], um detector de envelope que recebe o sinal de DP. Uma baixa taxa

de amostragem é desejável, pois, reduz os requisitos do conversor analógico-digital (ADC - *Analogic Digital Converter*). Esse artifício ainda reduz o consumo de energia do ADC e também o consumo necessário para processar localmente e/ou transmitir os dados para um nó receptor. No trabalho foi utilizado o detector de envelope RF ADL5511, fornecido pela Analog Devices. Testes do sistema radiométrico com o detector de envelope foram realizados em dois laboratórios de universidades do Reino Unido [73].

Uma rede de radiômetros denominada PD WSN (*PD Wireless Sensor Network*) também já foi proposta [14]. A PD WSN é formada por uma rede de radiômetros sensores de DP, cada um ligado a um nó da rede de sensores sem fio. No trabalho são colocadas duas observações a respeito dos problemas de compatibilidade eletromagnética que podem ocorrer nesse tipo de aplicação. São eles (i) a possível interferência dos sinais de DP com os sinais de comunicação da rede de sensores sem fio, acarretando no mau desempenho da rede e (ii) aumento da potência radiométrica de DP medida por conta dos sinais da rede, levando a uma superestimação da intensidade de DP. A primeira maneira para mitigar ambos os problemas seria a escolha adequada da banda de frequência de medição do sensor e banda de operação da rede. A maior parte da energia irradiada pela DP tipicamente se encontram em frequências abaixo de 800 MHz e a banda de frequência proposta para a PD WSN é a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,45 GHz. Com relação à (i), estudos realizados [74], revelam que o ambiente eletromagnético de uma subestação não tem impacto significativo sobre uma rede ZigBee operando na banda de frequência ISM. Com relação à (ii), uma filtragem apropriada no radiômetro irá garantir que a presença dos sinais da rede não afetará consideravelmente a medição de DP. Observações referentes à interferência devido à emissão eletromagnética resultante de chaveamentos e sinais de comunicação, como por exemplo, os de rádio e televisão, também são colocadas. A operação de dispositivos de chaveamento que interrompem a corrente do sistema de potência e resultam em uma emissão eletromagnética, representa uma potencial fonte de interferência, entretanto, essas emissões são infrequentes e de duração limitada, dessa forma, não é confundida com o sinal de DP genuíno. Já o problema da interferência com os sinais de comunicação, pode ser mitigado pelo fato de que os sinais irão atingir igualmente as medições radiométricas em todos os sensores. Cada nó do sistema proposto, contém um detector de potência de RF, um banco de filtros com quatro canais, uma unidade de condicionamento de sinais e um microcontrolador. O primeiro canal do filtro é utilizado para a localização de DP, enquanto que os outros três são utilizados para diagnóstico. Após o processo de filtragem, os sinais passam pela unidade de condicionamento. Nessa unidade, tem-se um circuito com comparadores, integrador e multivibradores monoestáveis. Os dados dos multivibradores são enviados para um microcontrolador, no qual faz a contagem dos pulsos de DP por ciclo de tensão e analisa a força do sinal de DP. Por fim, os dados processados pelo microcontrolador são enviados para um nó de gerenciamento, através de uma rede WirelessHart.

4.3 Determinação do TDOA e Estimação da Localização

Nesta seção estão descritos os principais métodos encontrados na literatura para a determinação do TDOA. Em seguida, estão descritas as maneiras de se estimar a localização. Tal estimativa pode ser baseada nos dados do TDOA ou nas intensidades dos sinais recebidas pelos sensores (RSS).

4.3.1 TDOA

A determinação da diferença do tempo de chegada dos sinais nos sensores é crucial para os métodos de localização. A estimação precisa desses dados determina a precisão da localização [55]. Existem na literatura alguns métodos utilizados, tais como: método da energia acumulada (*cumulative energy*) [55, 60, 75, 76]; método do primeiro pico (*first peak method*) [60, 76]; método do limiar (*threshold method*) [75]; e método da correlação cruzada (*cross-correlation method*) [60]. A seguir, estão descritos os métodos citados para a determinação do TDOA.

Método da Energia Acumulada

Quando os sensores são instalados distantes um dos outros, as formas de onda de DP tendem a ter padrões diferentes. Entretanto, a energia dos sinais pode ser assumida como dependente da distância da fonte de DP. Pela conversão das amplitudes de DP para a energia cumulativa, uma tendência similar é esperada por conta do aumento da energia acumulada no tempo. Portanto, a diferença do tempo pode ser determinada por essas curvas de energia cumulativa [60].

As formas de onda de DP são normalmente capturadas utilizando um osciloscópio ou digitalizador de alta largura de banda e os resultados são gravados em termos de magnitude versus tempo. Dada uma impedância de medição fixa R , a energia pode ser calculada pelo quadrado da curva de tensão:

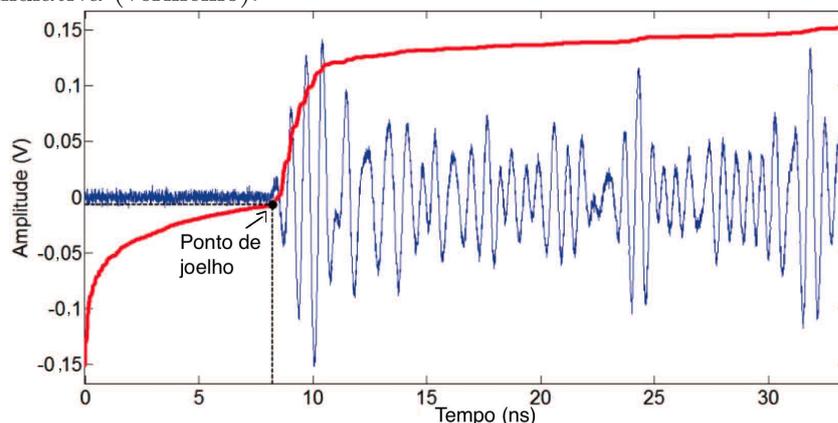
$$U = \int \frac{V^2}{R} dt \quad (4.2)$$

Logo, a energia até o tempo t_k , e normalizada para a resistência de 1 ohm, pode ser expressa pela Equação (4.3), onde $V(t_i)$ é o sinal de entrada amostrado no instante t_i . Se N é o número total de amostras em cada curva de tensão, então $U(t_N)$ corresponde à energia total do sinal [60].

$$U(t_k) = \sum_{i=1}^k (V(t_i))^2 \quad (4.3)$$

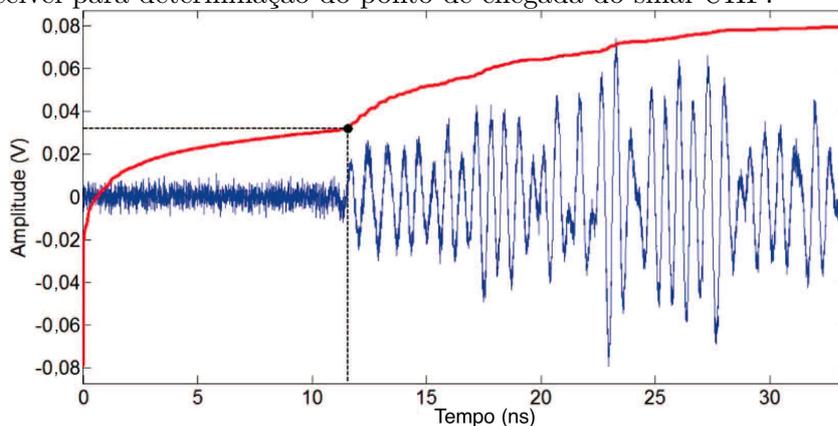
Na Figura 4.3, tem-se um exemplo de sinal UHF de DP (azul) com a curva da energia acumulada (vermelho). O ponto onde ocorre um repentino aumento no acúmulo de energia é o ponto de joelho. Não existe definição matemática para quantificar essa condição, desse modo, a interpretação do ponto de joelho por diferentes observadores pode resultar em diferentes tempos de chegada dos sinais [60]. Mirzaei *et al.* [55] consideram que o ponto de joelho é o momento em que o sinal de ruído dá lugar ao sinal. Entretanto, em casos em que a energia eletromagnética é transmitida com atraso devido à reflexões ou quando a energia transmitida por rotas paralelas mais longas é maior do que a da rota mais curta do início da frente de onda do sinal, o método da energia cumulativa pode não resultar em um ponto de joelho claramente reconhecível. O sinal representado na Figura 4.4 é um exemplo desse caso. Na Figura 4.5 está um exemplo de obtenção da diferença do tempo de chegada do sinal em três sensores, com o método da energia cumulativa.

Figura 4.3 Determinação do tempo de chegada de um sinal UHF (azul) utilizando o método da energia cumulativa (vermelho).



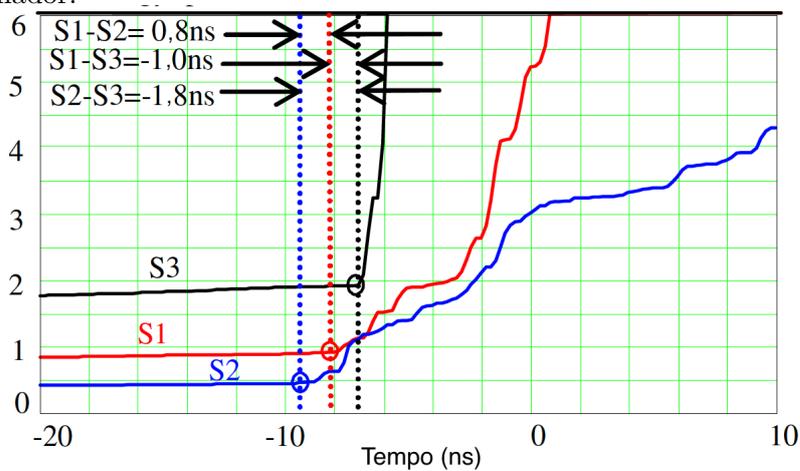
Adaptado de [55].

Figura 4.4 Método da energia cumulativa (vermelho) claramente não mostra um ponto de joelho reconhecível para determinação do ponto de chegada do sinal UHF.



Adaptado de [55].

Figura 4.5 Energia cumulativa de sinais UHF obtidos de três sensores distribuídos no tanque de um transformador.

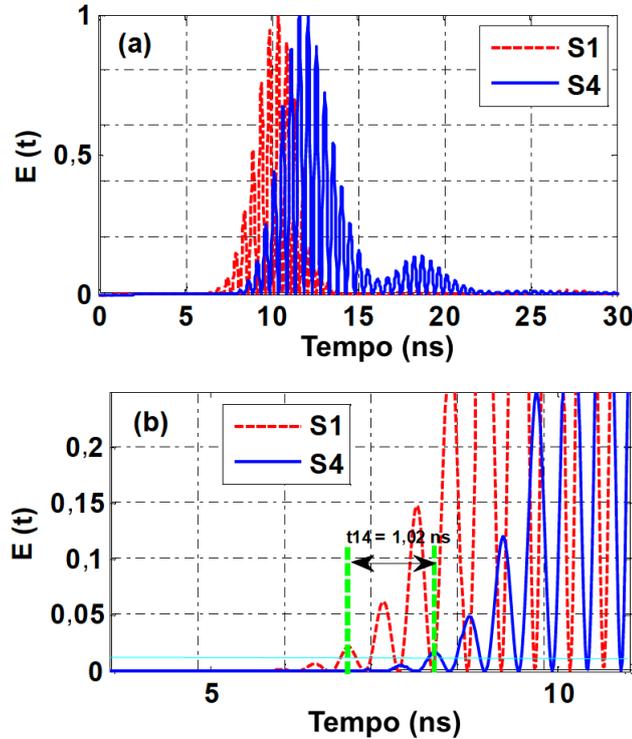


Adaptado de [76].

Método do Primeiro Pico

Assumindo-se que os sinais nos tanques dos transformadores se propagam da mesma maneira em todas as direções, os sensores irão capturar os mesmos pulsos de DP e produzir ondas similares. A diferença do tempo de chegada entre os sinais pode ser determinada pelos primeiros picos das formas de onda obtidas de diferentes sensores. O primeiro pico é definido como o primeiro instante de tempo em que a amplitude do sinal excede um certo nível. Um limiar mínimo é necessário para conter a presença de ruído nos sinais, o que pode ser inevitável mesmo depois da aplicação de um processo de remoção do ruído [60]. Na Figura 4.6(a) tem-se o gráfico de sinais obtidos a partir de dois sensores denominados S1 e S4, enquanto que na Figura 4.6(b) tem-se uma visão ampliada para que se perceba a diferença do tempo de chegada dos sinais nos sensores S1 e S4.

Figura 4.6 (a) Sinal normalizado nos sensores S1 e S4. (b) Visão ampliada para que se perceba a diferença do tempo de chegada dos sinais nos sensores S1 e S4 através do método do primeiro pico.



Adaptado de [76].

Método do Limiar

Nesse método calcula-se o quadrado da amplitude do sinal, o que torna o sinal unipolar. O tempo de chegada é determinado quando V^2 alcança um certo limiar. Na Figura 4.7 tem-se um gráfico extraído de [75], onde o limiar escolhido foi dois por cento do valor máximo de V^2 .

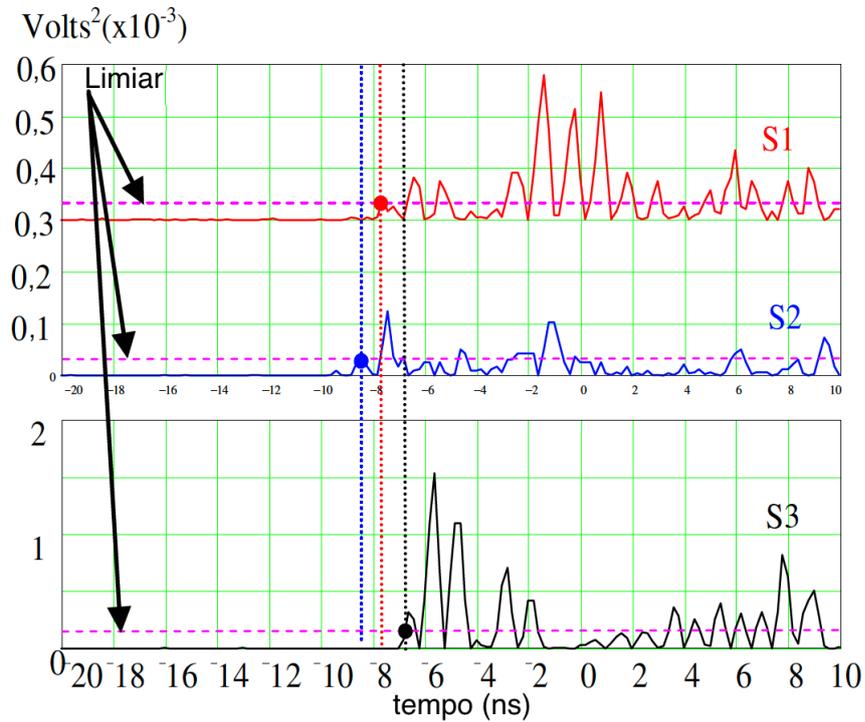
Uma variação do método limiar também foi encontrada [55], denominado de método do limiar com janela de tempo médio (*Average Time Window Threshold Method*), com a justificativa de que, apesar de o método do limiar ser facilmente automatizado, ele trará erros no resultado caso o nível de ruído ultrapasse o limiar. No novo método, a média do sinal V sobre uma janela deslocada no eixo do tempo é usada para gerar um sinal como segue:

$$T(m) = \frac{1}{w} \sum_{i=m-w+1}^m |V_i|, \quad m \geq w \quad (4.4)$$

onde w é a largura da janela de tempo. O valor de w é determinado pelo espectro de frequência do sinal UHF utilizando as Equações (4.5) e (4.6).

$$w = \frac{1}{2f_d} \quad (4.5)$$

Figura 4.7 Gráfico de V^2 versus o tempo de sinais UHF para obtenção da diferença de tempo dos sinais pelo método do limiar.

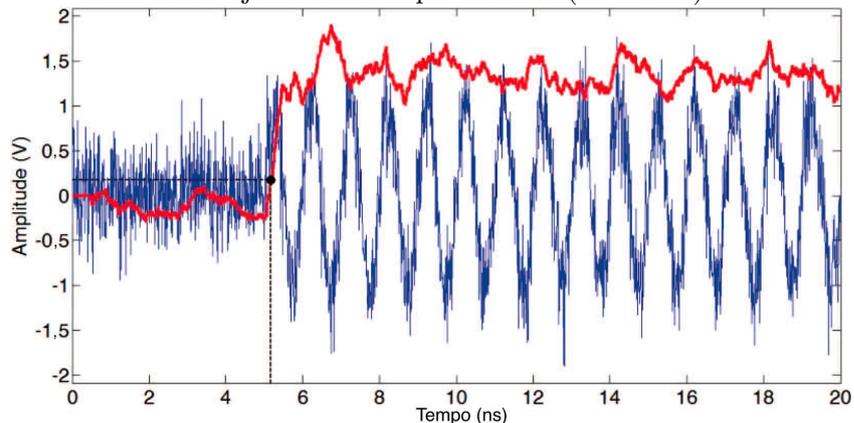


Adaptado de [75].

$$f_d = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \cdot V(f_i)}{\sum_{i=1}^N V(f_i)} \tag{4.6}$$

onde f_d é a média da frequência do sinal calculada usando o espectro de frequência de $V(f)$. Na Figura 4.8 tem-se um exemplo de aplicação do método para um sinal senoidal com baixa relação sinal-ruído. Neste exemplo, mesmo com o ruído, é possível determinar o tempo de chegada do sinal.

Figura 4.8 Determinação do tempo de chegada de uma onda senoidal (azul) com baixa relação sinal-ruído usando o a média da janela de tempo do sinal (vermelho).



Adaptado de [55].

Método da Correlação Cruzada

O TDOA entre dois sensores pode ser determinado pela correlação cruzada dos sinais. A correlação cruzada mede a similaridade entre duas formas de onda como uma função do atraso de tempo aplicado a uma delas. Uma forma de onda é considerada estacionária e a outra é deslocada em direção à onda estacionária. A similaridade entre essas duas formas de onda é então calculada. O TDOA é determinado como sendo a localização onde a correlação cruzada atinge o seu pico. Para funções perfeitamente correlacionadas, tais como as aleatórias, o valor da correlação cruzada é zero. A correlação cruzada $f(t)$ de duas funções contínuas $g(t)$ e $h(t)$ é definida como:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{g}(\tau)h(t + \tau)d\tau \quad (4.7)$$

onde \bar{g} é o complexo conjugado de g . Se a função é discreta, a correlação é similarmente definida como:

$$f(n) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \bar{g}(m)h(n + m) \quad (4.8)$$

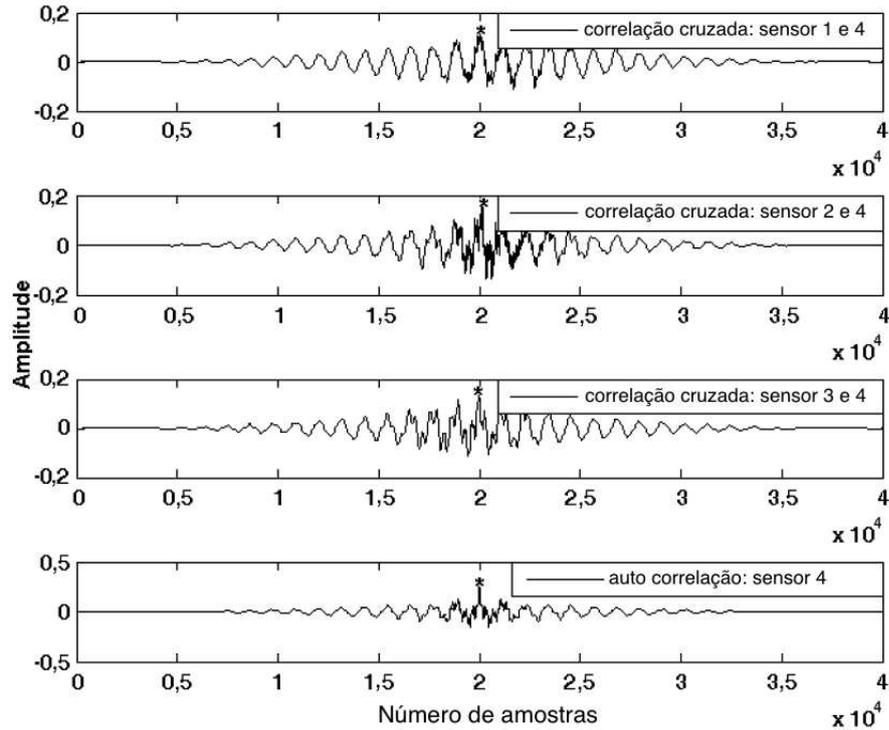
Além disso, se essas funções discretas são séries temporais de duração finita, tem-se:

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-|n|-1} g(m)h(n + m) \quad (4.9)$$

onde N é o número de amostras.

Na Figura 4.9, tem-se um exemplo de correlação cruzada de [60], onde o sinal foi capturado de um sensor de referência 4 e os demais sinais de outros três sensores. O TDOA é então determinado pelo *offset* (em termos de amostras) entre os picos. A referência é o pico de auto-correlação.

Figura 4.9 Correlação cruzada das formas de onda obtidas dos sensores k ($k = 1, 2, 3$) e do sensor de referência 4. Os picos são marcados com *.



Adaptado de [60].

4.3.2 Estimação da Localização

A seguir são descritos alguns métodos para a estimação da localização da DP a partir do sinal RF propagado. Os métodos de cálculo citados são baseados no TDOA [59], intensidade do sinal (RSS) [21] e *fingerprinting* da intensidade do sinal [69].

Baseado no TDOA

A localização da fonte de DP envolve a solução simultânea de um conjunto de equações geométricas não lineares. Considere uma posição 3D representada por coordenadas retangulares (x, y, z) com um subscrito “s” denotando a fonte de DP, e os subscritos 1 a 4 (ou até q) denotando as posições das antenas. Assumindo que o pulso de DP ocorrerá em um instante de tempo desconhecido τ , chegando em quatro antenas nos instantes t_1 a t_4 . Assumindo também que a frente de onda do sinal de DP se expande radialmente a partir da posição fonte, na velocidade da luz, c , a propagação é representada pela seguinte equação genérica [59]:

$$c^2(t_q - \tau)^2 = (x_s - x_q)^2 + (y_s - y_q)^2 + (z_s - z_q)^2 \quad (4.10)$$

Visto que o instante de tempo τ , em que ocorreu a DP, é desconhecido e que os tempos de chegada são conhecidos apenas como diferenças, as equações de propagação podem ser mais usualmente escritas como:

$$ct_{12} = g_1 - g_2 \quad (4.11)$$

$$ct_{13} = g_1 - g_3 \quad (4.12)$$

$$ct_{14} = g_1 - g_4 \quad (4.13)$$

onde:

$$g_q = \sqrt{(x_s - x_q)^2 + (y_s - y_q)^2 + (z_s - z_q)^2} \quad (4.14)$$

e $t_{12} = t_1 - t_2$, etc. As Equações (4.11) a (4.13) contém três variáveis desconhecidas (x_s, y_s, z_s) e podem ser solucionadas por iteração, utilizando por exemplo, o método de Newton-Raphson. Outros métodos, tais como o Método dos Mínimos Quadrados ou o algoritmo de Bancroft, podem ser utilizados para a solução das equações [77].

Caso a aplicação seja para localização de DP em transformadores de potência utilizando sensores acústicos, a velocidade da luz, c , é substituída pela velocidade do som, v_s . Se o sistema de localização utiliza a medição acústica com disparo pelo sinal eletromagnético da DP, o TOA pode ser aplicado, como encontrado em [63] e [78]. Nesse caso, o sinal eletromagnético indica o instante de tempo em que ocorreu a DP, e, assim, os instantes de tempo absolutos em que o sinal chega até os sensores acústicos serão conhecidos, sendo não necessária a determinação do TDOA.

Baseado na Intensidade do Sinal (RSS)

O método de propagação clássico utilizado para a localização baseada no RSS pode ser escrito como [21]:

$$P_r = \frac{k}{r^n} \quad (4.15)$$

onde k é uma constante que depende dos parâmetros do sistema, tais como: ganho da antena transmissora, ganho da antena receptora, frequência, etc; e r é a distância entre transmissor e receptor, n é o índice de perdas de caminho e P_r a potência recebida.

Considerando uma fonte de DP localizada em s e considerando que quatro nós sensores receberão os sinais emitidos a partir da fonte, podemos calcular a potência recebida nos nós 1 a 4:

$$P_{r1} = \frac{k}{r_1^n} \quad (4.16)$$

$$P_{r2} = \frac{k}{r_2^n} \quad (4.17)$$

$$P_{r3} = \frac{k}{r_3^n} \quad (4.18)$$

$$P_{r4} = \frac{k}{r_4^n} \quad (4.19)$$

Para ambientes caracterizados por um único índice n , as razões das potências recebidas podem ser usadas para encontrar uma relação entre a distância da fonte de DP para dois sensores, como segue:

$$\frac{P_{r1}}{P_{r2}} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^n \quad (4.20)$$

$$r_2 = r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{r1}}{P_{r2}}} \quad (4.21)$$

Repetindo para r_3 e r_4 :

$$r_3 = r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{r1}}{P_{r3}}} \quad (4.22)$$

$$r_4 = r_1 \sqrt[n]{\frac{P_{r1}}{P_{r4}}} \quad (4.23)$$

Observe que a constante k foi eliminada nesse processo.

Da mesma forma que o cálculo baseado no TDOA, podemos utilizar a equação esférica para o cálculo da localização:

$$r_q = \sqrt{(x_s - x_q)^2 + (y_s - y_q)^2 + (z_s - z_q)^2} \quad (4.24)$$

onde r_q é a distância entre os sensores q e a fonte de DP.

Baseado no *Fingerprinting* da Intensidade do Sinal (RSS *Fingerprinting*)

Os métodos do TDOA, TOA e DOA, embora sejam amplamente utilizados, são mais complexos e têm maior custo de *hardware* para implementação [68]. No método que se baseia apenas no RSS, a transmissão do sinal está sujeita à influência do espaço e do ambiente eletromagnético. O método que utiliza o *fingerprinting* da intensidade do sinal ou RSS, pode contornar esse problema através do sinal recebido em tempo real com um *fingerprint* ou mapa de rádio [69].

O método do RSS *Fingerprinting* é dividido em duas fases, *offline* e *online*. Na fase *offline*, um sinal RF é gerado em pontos previamente estabelecidos. Para cada ponto em que o sinal é gerado, as coordenadas desses pontos são registradas e o RSS recebido em cada antena são armazenados em um vetor. Esse processo irá criar o banco de dados ou mapa de rádio [68]. Considere que em uma localização conhecida L1, onde o sinal é gerado, o RSS recebido em n antenas é armazenado. O vetor associado à L1 será definido como:

$$ss_{L1} = \left[ss_{L1,1} \quad ss_{L1,2} \quad ss_{L1,3} \quad \dots \quad ss_{L1,n} \right] \quad (4.25)$$

onde $ss_{L1,n}$ é o sinal recebido pela n -ésima antena quando o sinal foi gerado em L1. Esse mesmo procedimento é repetido quando o sinal é gerado em outras posições e os respectivos vetores são inseridos no banco de dados. Na fase *online*, o RSS em tempo real é capturado para criar o vetor da medida atual, conforme a seguir:

$$ss_c = \left[ss_{c,1} \quad ss_{c,2} \quad ss_{c,3} \quad \dots \quad ss_{c,n} \right] \quad (4.26)$$

onde $ss_{c,n}$ é o sinal atual medido pela n -ésima antena. Depois disso, a distância Euclidiana do vetor da medida atual para cada vetor do banco de dados é calculada. Em (4.27) é demonstrado como a distância de ss_c para ss_{L1} é calculada. Finalmente, a localização da fonte do sinal pode ser estimada pelo método do Vizinho Mais Próximo (*Single Nearest Neighbor*), K-Vizinhos Mais Próximos (KNN - *K-Nearest Neighbor*) ou K-Vizinhos Mais próximos Ponderados (WKNN - *Weighted K-Nearest Neighbor*).

$$d(ss_c, ss_{L1}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (ss_{c,i} - ss_{L1,i})^2} \quad (4.27)$$

O método do Vizinho Mais Próximo é o mais simples. Depois de calculada a distância Euclidiana do vetor atual com cada vetor do banco de dados, estima-se que a fonte do sinal está na localização associada ao vetor do banco de dados que tem a menor distância para o vetor atual. Por exemplo, considere que o vetor atual está mais próximo ao vetor associado à localização L1. Nesse caso, estima-se que a fonte do sinal está em L1.

O método dos K-Vizinhos Mais Próximos pode ser usado ao invés do Vizinho Mais Próximo para se obter uma melhor precisão na localização. Diferente do método anterior, o KNN irá considerar K vetores do banco de dados nos quais têm a menor distância para o vetor atual. A localização estimada é calculada pela média das localizações associadas aos K vetores, como segue:

$$X_E = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i \quad (4.28)$$

$$Y_E = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Y_i \quad (4.29)$$

onde (X_E, Y_E) são as coordenadas da localização estimada da fonte de sinal e (X_i, Y_i) são as coordenadas dos K-vizinhos mais próximos.

No caso de o vetor atual estar mais próximo a um determinado vetor do que a outros do banco de dados, a média simples do método do KNN irá ignorar essa proximidade e isso trará erros. No método dos K-Vizinhos Mais próximos Ponderados, para cada um dos K vetores, o quanto mais próximo ele estiver do vetor atual, maior será o seu peso. Na forma de equação:

$$X_E = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^k \frac{1}{d(ss_c, ss_{Li}) + d_0} X_i \quad (4.30)$$

$$Y_E = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^k \frac{1}{d(ss_c, ss_{Li}) + d_0} Y_i \quad (4.31)$$

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{1}{d(ss_c, ss_{Li}) + d_0} \quad (4.32)$$

Se a distância Euclidiana for nula, um pequeno valor dado a d_0 irá evitar uma divisão por zero.

4.4 Conclusões

Os métodos de localização de descargas parciais podem ser aplicados em um equipamento individual ou em uma área. Em ambos os casos, é necessário que se determine o TOA, o TDOA, o DOA ou o RSS para que a localização seja estimada por triangulação. Uma alternativa ao método que utilizada apenas o RSS é o RSS *Fingerprinting*, onde a localização é estimada com base em um mapa de rádio do local. O método do RSS *Fingerprinting* foi adotado neste trabalho para os testes de localização. No capítulo a seguir, são detalhados a composição do nó sensor para a detecção da intensidade do sinal RF, o sinal de DP emulado utilizado nos testes, bem como os instrumentos virtuais utilizados nas fases *offline* e *online* do método do RSS *Fingerprinting*.

Capítulo 5

Medição e Aquisição de Dados, Emulação do Sinal de DP e Instrumentos Virtuais

No sistema proposto nesta dissertação, nós distribuídos em um ambiente com equipamentos de alta tensão sujeitos à ocorrência de descargas parciais, devem detectar a intensidade dos sinais RF originados por essas descargas. Cada nó envia os dados das medições para um nó central. Este, envia os dados para um computador para que sejam processados em um algoritmo. Para emulação e teste do sistema em laboratório, um sinal oriundo de um gerador de RF é irradiado através de uma antena. A frequência do sinal gerado pertence à faixa das possíveis frequências de um sinal RF resultante de uma DP. Os dados enviados pelo nó central ao computador, são processados por um algoritmo executado em um instrumento virtual para que a localização da fonte de DP seja estimada. Um instrumento virtual também é utilizado para criar o *Fingerprint* do ambiente.

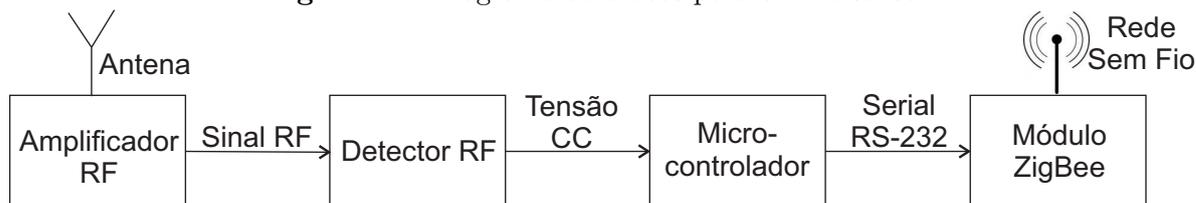
5.1 Medição e Aquisição de Dados

Cada nó sensor do sistema está representado pelo diagrama de blocos da Figura 5.1. Todos eles são compostos por uma antena, um amplificador RF de baixo ruído (LNA - *Low Noise Amplifier*), um detector de sinais RF, um microcontrolador e um módulo ZigBee. A antena, o amplificador e o detector possuem impedância de 50Ω .

A antena que capta os sinais RF é multibanda e atua na faixa de frequência de $0,38 \sim 2,4$ GHz. O modelo possui um cabo acoplado com conector SMA (*SubMiniature version A connector*) que neste caso é conectado diretamente à entrada do amplificador.

O amplificador RF de baixo ruído (*Maxim Integrated* MAX2630) tem polarização interna ao circuito integrado e necessita apenas de capacitores de acoplamento na entrada e saída para bloquear sinais CC (corrente contínua). O dispositivo amplifica sinais na

Figura 5.1 Diagrama de blocos para um nó sensor.



Fonte: Produzida pelo autor.

faixa de 0,1 ~ 1 GHz com um ganho de 13,4 dB. Para acomodar o circuito integrado do amplificador e os capacitores de acoplamento, foi confeccionada uma placa que contém também os conectores SMA fêmea de entrada e saída e os pinos para alimentação do dispositivo. O cabo vindo da antena é ligado ao conector de entrada e na saída é conectado um cabo coaxial também de 50 Ω , no qual conduz o sinal amplificado até o detector RF.

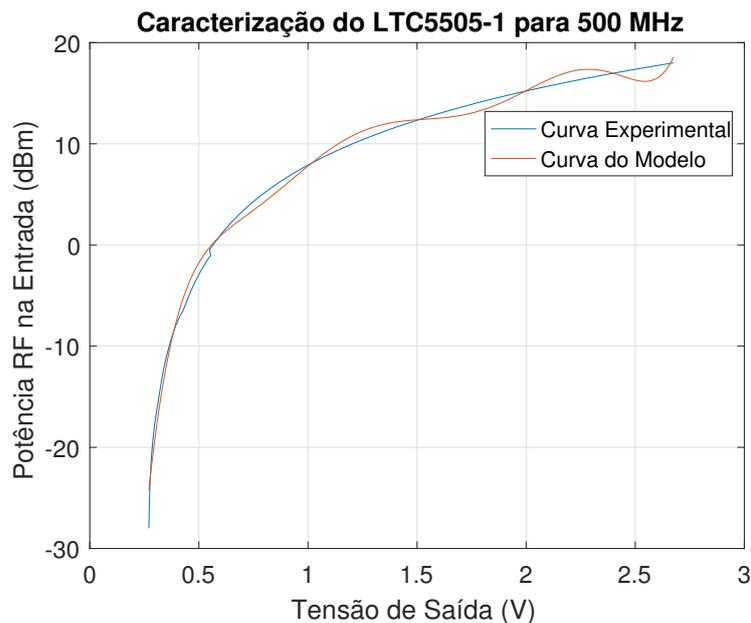
O detector RF (*Linear Technologies LTC5505-1*) detecta sinais na faixa de frequência de 0,3 ~ 3 GHz com intensidades de -28 à 18 dBm. Resumindo o seu funcionamento, o detector gera na sua saída uma tensão CC de uma intensidade tal, que depende da potência do sinal RF na sua entrada. Para utilizar o detector, foram confeccionadas réplicas da placa de avaliação disponibilizada pelo fabricante do dispositivo. A placa contém um conector SMA fêmea para entrada do sinal RF, capacitor de acoplamento para a entrada RF, pinos para alimentação do circuito integrado e outro pino com a tensão de saída a ser medida.

A faixa de frequência em que o sistema pode atuar é de 380 MHz à 1 GHz, já que 380 MHz é a frequência mínima em que a antena é capaz de captar sinais e 1 GHz é a frequência máxima em que o amplificador pode aplicar o ganho especificado. A faixa de operação do sistema é aceitável para a aplicação, visto que cobre a maior parte da faixa de frequência onde as descargas parciais têm maior energia, a faixa entre 50 e 800 MHz [73].

Para se estimar a intensidade em dBm do sinal RF por meio da tensão CC lida na saída do detector, o dispositivo foi caracterizado. O gerador de RF (*Keysight Technologies N5172B*) foi conectado por meio de um cabo coaxial à entrada do detector e foi aplicado um sinal de 500 MHz com potências de -28 à 18 dBm. Para cada nível de potência aplicado, a tensão de saída do detector era medida com um voltímetro. Os dados foram registrados em uma planilha e lidos pelo Matlab para a geração dos coeficientes do polinômio que servirá como modelo. O polinômio obtido é de 7^a ordem e retorna a intensidade do sinal RF em dBm a partir da tensão CC (V) na saída do detector (Equação (5.1)). A curva característica do detector e a curva do modelo estão apresentadas na Figura 5.2. A curva característica é obtida através dos dados experimentais, enquanto que a curva do modelo é obtida quando se atribui valores de tensão ao polinômio, para se estimar a intensidade do sinal RF. A curva do modelo se aproxima da experimental, dessa forma, o polinômio obtido foi utilizado no restante do trabalho.

$$\begin{aligned} \text{Potência (dBm)} = & 23V^7 - 245,6V^6 + 1073,5V^5 - 2476,9V^4 + 3243,6V^3 - 2411,1V^2 \\ & + 961,7V - 160,3 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Figura 5.2 Curva característica e curva do modelo do detector RF LTC5505-1 para uma frequência de 500 MHz.



Fonte: Produzida pelo autor.

Como o processo foi realizado com um sinal de 500 MHz, a caracterização obtida é para esta frequência, visto que o detector possui diferentes respostas para diferentes frequências. O principal objetivo deste trabalho é validar o funcionamento da rede de sensores sem fio, juntamente com o algoritmo de localização. Entretanto, sabe-se que as descargas parciais podem gerar sinais eletromagnéticos em uma larga faixa de frequência. Dessa forma, a inclusão de novas faixas será considerada nas propostas de trabalhos futuros.

O microcontrolador utilizado (*Analog Devices ADuC7026*) realiza a leitura da tensão de saída do detector RF a partir de seu conversor analógico-digital (ADC) com resolução de 12 bits. Um algoritmo executado no microcontrolador constrói um pacote no qual contém um número que identifica o nó e o valor da amostra lida pelo ADC. Este pacote é enviado do microcontrolador para o módulo ZigBee através da interface de comunicação serial RS-232.

Os dispositivos descritos acima formam os nós sensores para a medição da intensidade do sinal RF gerado por uma DP. Para que se forme uma rede de sensores sem fio (RSSF) cada nó sensor é ligado a um módulo ZigBee. Uma rede de sensores sem fio pode ser definida como uma coleção de nós computacionais compactos e relativamente baratos,

que realizam medições locais em um ambiente e encaminham as informações a um ponto central para serem apropriadamente processadas. Os nós de uma RSSF podem realizar medições, podem comunicar-se com nós vizinhos, e em alguns casos, podem realizar processamentos básicos com os dados coletados [79]. Aplicações de RSSF são encontradas em vários campos como: monitoramento de áreas e condições ambientais, coleta de dados de tráfego, monitoramento remoto de pacientes hospitalares, agricultura, instrumentação de fábricas, redes elétricas, etc [80].

O ZigBee é um padrão que define um conjunto de protocolos de comunicação para redes sem fio com baixa taxa de transmissão de dados e curto alcance. Dispositivos sem fio baseados em ZigBee operam nas bandas de frequência 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz. A máxima taxa de transmissão é 250 Kbps (Kilobits por segundo). O ZigBee é adequado principalmente para aplicações alimentadas por baterias, onde uma baixa taxa de dados, baixo custo e vida longa da bateria são os principais requisitos [81]. A necessidade de se padronizar uma tecnologia para ser utilizada em redes de sensores sem fio, fez algumas empresas reunirem-se para criar o ZigBee, no qual foi montado sobre as camadas PHY (*Physical Layer* - Camada Física) e MAC (*Medium Access Control Layer* - Camada de Controle de Acesso ao Meio) do protocolo IEEE 802.15.4. Foram criadas sobre padrão do IEEE, as camadas NWK (*Network Layer* - Camada de Rede) e APL (*Application Layer* - Camada de Aplicação) [82].

Na transformação de sistemas de potências em redes inteligentes (*Smart Grids*), existem outras tecnologias sem fio as quais podem ser integradas aos sensores, como Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1) e UWB (*Ultra Wide Band* - IEEE 802.15.3). Entretanto, o ZigBee é um forte candidato para esse tipo de aplicação, já que rapidamente o dispositivo se ajusta em uma rede e inicia a transmissão de dados, aliado a uma baixa taxa de transmissão, baixo custo e baixo consumo de energia [83]. Estudos analisam o desempenho de uma rede ZigBee em ambientes de subestação, onde ruídos impulsivos causados pelas descargas parciais ou chaveamentos, podem comprometer o funcionamento da rede [83–85].

Neste trabalho, o modelo de módulo utilizado para implementar uma rede ZigBee é o XBee-Pro (Digi International Inc.) operando na frequência de 2,4 GHz, de forma a não interferir na faixa de frequência de detecção da DP. Os módulos XBee incluem conversores ADC, entradas e saídas digitais, geração de sinal modulado por largura de pulso (PWM - *Pulse-Width Modulated*) e comunicação serial RS-232. As principais especificações do XBee-Pro estão listadas na Tabela 5.1 enquanto que fotografia do módulo está apresentada na Figura 5.3.

Descritos os dispositivos que compõem um nó sensor representado na Figura 5.1, detalha-se agora o seu funcionamento. O primeiro componente, a antena, capta o sinal RF, que por sua vez terá sua intensidade aumentada pelo amplificador de baixo ruído. O detector RF recebe o sinal da saída do amplificador e transfere para um pino do circuito

Tabela 5.1 Principais Especificações do Módulo XBee-Pro.

Especificação	XBee-Pro
Alcance em Ambiente Interno/Urbano	Até 90 m
Alcance em Ambiente Externo sem Obstáculos	Até 1600 m
Potência de Transmissão	Até 63 mW (18 dBm)
Sensibilidade de Recepção	-100 dBm
Taxa de Transmissão	Até 250 Kbps
Número de Canais	12
Topologias de Redes Suportadas	Ponto-a-Ponto e Ponto-a-Multiponto
Frequência de Operação	2.4 GHz

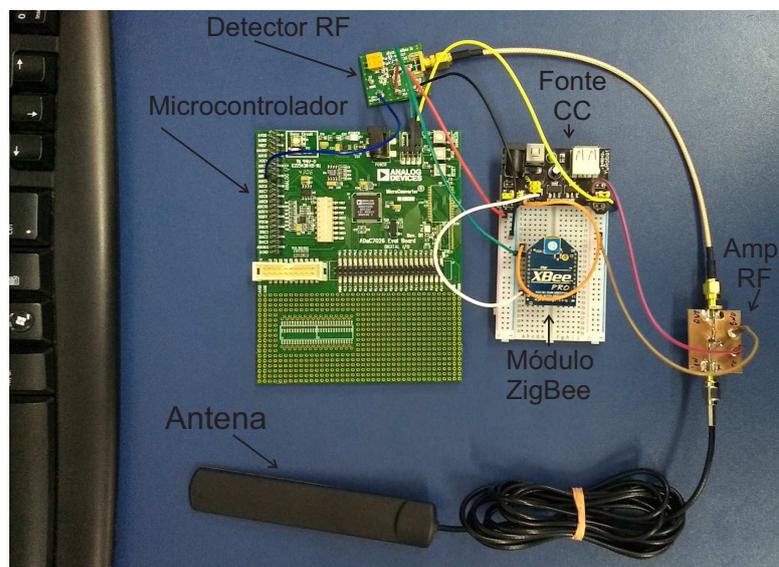
Fonte: [83].

Figura 5.3 Fotografia do Módulo XBee-Pro.Fonte: <https://www.digi.com/products/xbee>.

integrado, uma tensão CC em que o seu nível depende da intensidade do sinal RF. O nível de tensão CC é amostrado pelo ADC do microcontrolador. Este, executa um algoritmo no qual constrói-se um pacote que contém o número do nó e o valor da amostra do ADC. Esse pacote é transferido do microcontrolador para o módulo ZigBee via comunicação serial RS-232. Os módulos ZigBee dos nós sensores são configurados como dispositivos finais. Nesta configuração, os dispositivos apenas repassam informações para o coordenador da rede. Um outro módulo ZigBee configurado como coordenador, denominado aqui de nó central, recebe as informações de todos os nós sensores. Os dados são repassados do nó central para um computador através da comunicação serial e são recebidos pelos instrumentos virtuais executados no computador, sendo um para criação do *Fingerprint* e outro para a estimação da localização das descargas parciais. Detalhes da criação e funcionamento do instrumento virtual são descritos na Seção 5.3.

A fotografia dos componentes do nó sensor representado no diagrama de blocos da Figura 5.1, está apresentada na Figura 5.4. Numa matriz de contatos estão inseridos o módulo ZigBee e uma fonte CC não incluída no diagrama. A fonte tem dois níveis de tensão disponíveis, 3,3 e 5 V, sendo suficiente para energizar os componentes. O microcontrolador ADuC7026 foi utilizado na própria placa de testes desenvolvida pelo fabricante do dispositivo.

Figura 5.4 Fotografia dos componentes do nó sensor representado pelo digrama de blocos da Figura 5.1.



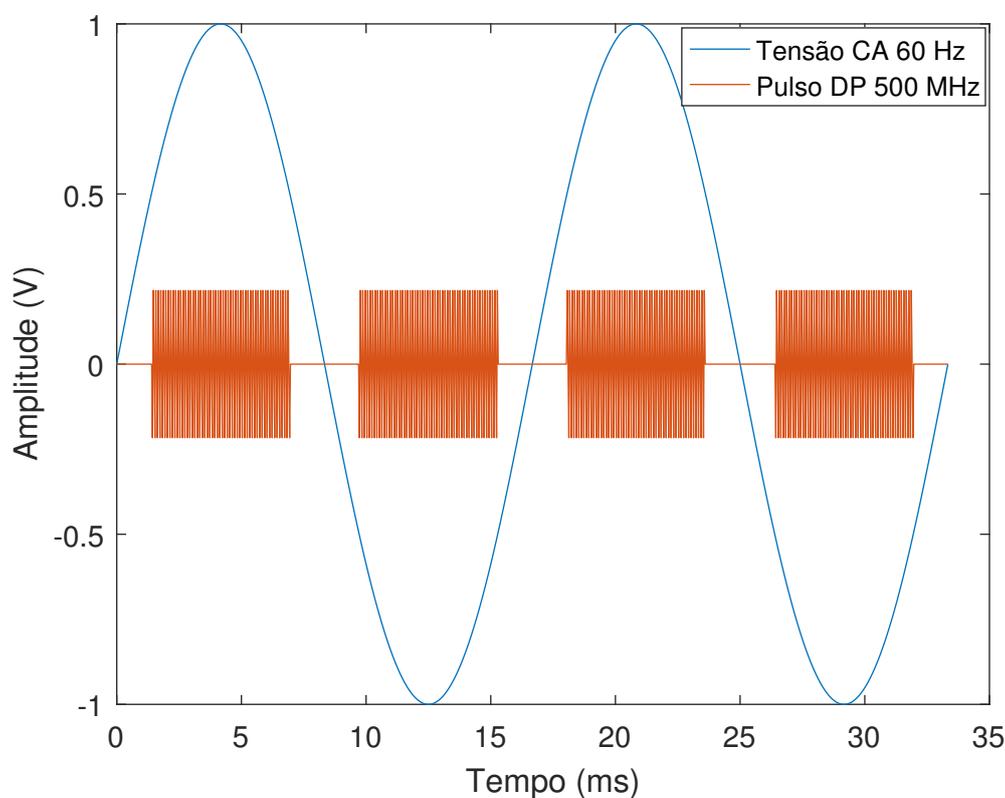
Fonte: Produzida pelo autor.

5.2 Emulação do Sinal de DP

Para teste do sistema, um sinal de DP é emulado através da função *Sweep* do gerador de RF. Nesta função, ajustes podem ser realizados para que os sinais tenham diferentes amplitudes em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Assumindo-se que os pulsos de descargas ocorrem quando o valor instantâneo da tensão alternada (CA) senoidal de 60 Hz for maior ou igual a 50 % de seu valor máximo e menor ou igual a 50% de seu valor mínimo, isso ocorrerá quando a fase do sinal estiver entre 30° e 150° e entre 210° e 330° , respectivamente. Para um período do sinal de 60 Hz (16,667 ms), estas faixas compreendem o intervalo de tempo de 1,389 à 6,944 ms e 9,722 à 15,278 ms. Dessa forma, o pulso se mantém ativo durante 5,555 ms do ciclo positivo e o mesmo tempo no ciclo negativo. Nos demais intervalos o pulso estará inativo. Fazendo-se uma correlação com os pulsos de corrente do modelo capacitivo (forma de onda da Figura 2.5) estes limites onde os pulsos de DP se iniciam teriam relação com os valores críticos $+u_z$ e $-u_z$. Um gráfico com dois ciclos de um sinal de referência de 60 Hz e um sinal de 500 MHz representando os pulsos de DP nos intervalos mencionados anteriormente, está apresentado na Figura 5.5.

Na configuração da função *Sweep* no modo *List*, a tela do gerador de RF exibe uma tabela similar à Tabela 5.2, onde para cada varredura ajusta-se a frequência do sinal, a potência e o tempo de permanência. Para que os pulsos gerados tenham comportamento similar ao da Figura 5.5, o ajuste foi realizado conforme a Tabela 5.2. O nível de potência de -144 dBm é o mínimo que o gerador suporta. Como o detector de RF utilizado não é capaz de detectar sinais com essa potência, nenhum sinal será detectado nas varreduras

Figura 5.5 Dois ciclos de um sinal de referência de 60 Hz e um sinal de 500 MHz representando os pulsos de DP.



Fonte: Produzida pelo autor.

1 e 3, logo, considera-se que neste momento não há pulsos. Nas varreduras 2 e 4, onde os pulsos estão ativos, a potência irradiada é de 19 dBm, sendo a máxima suportada pelo gerador. Somando-se os tempos de permanência, alcança-se o tempo de 16,666 ms, no qual corresponde a um período da tensão CA de 60 Hz. O gerador pode executar o *Sweep* continuamente ou apenas quando um botão de disparo for pressionado. Ressalta-se que o sinal de 60 Hz não é emitido pelo gerador, sendo usado apenas como referência para se determinar em quais intervalos os pulsos que emulam a DP estarão ativos.

Para emissão do sinal emulador da DP, foi utilizada uma antena telescópica a qual irradia o sinal omnidirecionalmente. A antena foi fixada em um tubo utilizado em instalações hidráulicas e este foi fixado em uma base de madeira, de formar a montar uma estrutura em que a antena pudesse ser movimentada e posicionada em qualquer local durante os testes. A conexão da antena com o gerador é feita com um cabo coaxial de 50 Ω .

Tabela 5.2 Ajustes realizados na função *Sweep* do gerador de RF.

Varredura	Frequência	Potência	Permanência
1	500 MHz	-144.00 dBm	2.778 ms
2	500 MHz	+19.00 dBm	5.555 ms
3	500 MHz	-144.00 dBm	2.778 ms
4	500 MHz	+19.00 dBm	5.555 ms

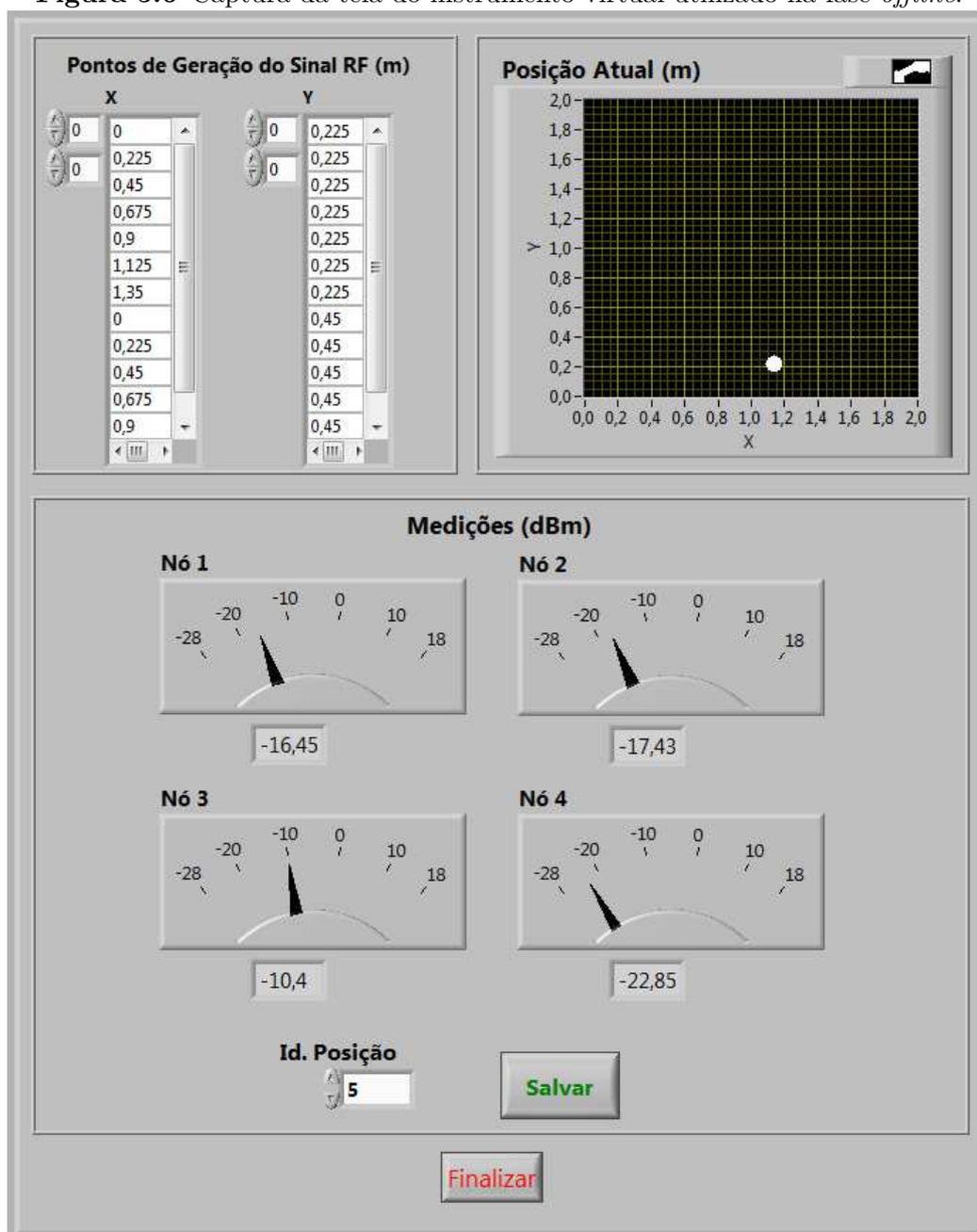
Fonte: Produzida pelo autor.

5.3 Instrumentos Virtuais

O sistema de localização de descargas parciais proposto neste trabalho, utiliza a técnica do *RSS Fingerprinting* para a estimar a localização. Desse modo, foram construídos dois instrumentos virtuais no LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Um é utilizado na fase *offline*, no qual constrói-se o *fingerprint* da intensidade do sinal no ambiente. O outro, é utilizado na fase *online* para estimar a localização da descarga. Este último instrumento virtual, faz a leitura do banco de dados criado pelo primeiro instrumento e estima a localização a partir da intensidade do sinal recebido em cada uma das antenas, em tempo real.

5.3.1 Fase *Offline*

Uma captura da tela do instrumento virtual da fase *offline* está apresentada na Figura 5.6, sendo este instrumento utilizado para construir *fingerprint* da intensidade do sinal no local. Em ‘Pontos de Geração do Sinal RF (m)’ são inseridos os pares ordenados (X,Y) das posições onde o sinal RF será gerado para a criação do *fingerprint*. Em ‘Id. Posição’ é colocado um número que identifica a posição onde o sinal é gerado para construção do *fingerprint*. Em ‘Posição Atual (m)’ um gráfico exibe as coordenadas onde o sinal deve ser gerado, de acordo com o identificador colocado em ‘Id. Posição’. Em ‘Medições (dBm)’ são exibidas as intensidades do sinal em dBm medidas por cada nó.

Figura 5.6 Captura da tela do instrumento virtual utilizado na fase *offline*.

Fonte; Produzida pelo autor.

Para compreender o funcionamento do instrumento virtual, considere a captura de tela da Figura 5.6. Inicialmente, as coordenadas onde o sinal será emulado para construção do *fingerprint*, foram definidas pelo usuário e inseridas na interface do instrumento. No caso em questão, a posição 0 corresponde às coordenadas ($X=0, Y=0,225$) m, a posição 1 às coordenadas ($X=0,225, Y=0,225$) m, e assim por diante. Com o instrumento sendo executado, suponha que o usuário deseje salvar a intensidade do sinal medida por cada nó quando o sinal é emulado na posição 5. Em 'Id. Posição' deve-se então inserir o número 5. Neste momento, o gráfico 'Posição Atual (m)' estará exibindo a localização na área onde a antena que irradia o sinal deve ser posicionada, que neste exemplo, são as coordenadas

($X=1,125, Y=0,225$) m. Com a antena colocada na posição correta, pressiona-se o botão ‘Salvar’ para armazenar-se os dados medidos por cada nó quando o sinal foi emulado naquela posição.

Cada vez que o botão ‘Salvar’ é pressionado o instrumento cria uma linha em um arquivo CSV (*Comma-Separated Values*), no qual contém o número da posição, as coordenadas associadas à posição e as tensões de saída dos detectores RF de cada nó. Apesar de a interface do instrumento exibir os dados das medições em dBm, o arquivo é criado com as tensões lidas dos detectores RF. Para que as medições sejam exibidas em dBm, um *script* do Matlab que é executado dentro do instrumento estima a intensidade em dBm a partir da tensão lida e do polinômio que caracteriza o detector. A Tabela 5.3 contém um trecho do arquivo CSV de um *fingerprint* com as medições referentes às seis primeiras posições. Originalmente, no arquivo CSV os dados são separados por vírgula, entretanto, para facilitar a leitura, neste texto os dados foram colocados em forma de tabela.

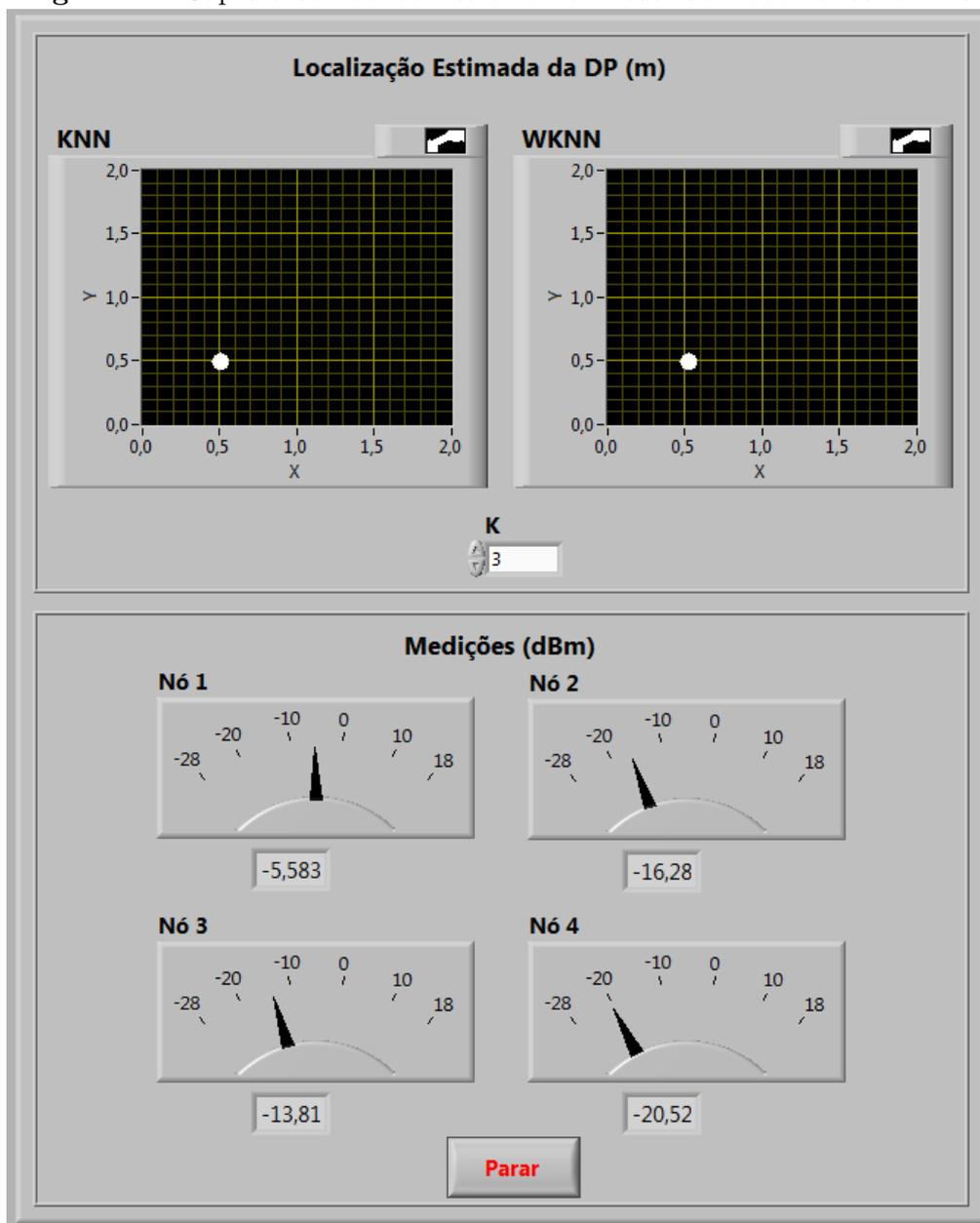
Tabela 5.3 Seis primeiras medições para a criação do *fingerprint* de uma área.

N_p	X (m)	Y (m)	V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	V_4 (V)
0	0,000	0,225	0,396	0,314	0,303	0,303
1	0,225	0,225	0,392	0,299	0,271	0,289
2	0,450	0,225	0,372	0,281	0,332	0,286
3	0,675	0,225	0,333	0,280	0,369	0,289
4	0,900	0,225	0,300	0,286	0,396	0,295
5	1,125	0,225	0,285	0,300	0,403	0,295

Fonte: Produzida pelo autor.

5.3.2 Fase *Online*

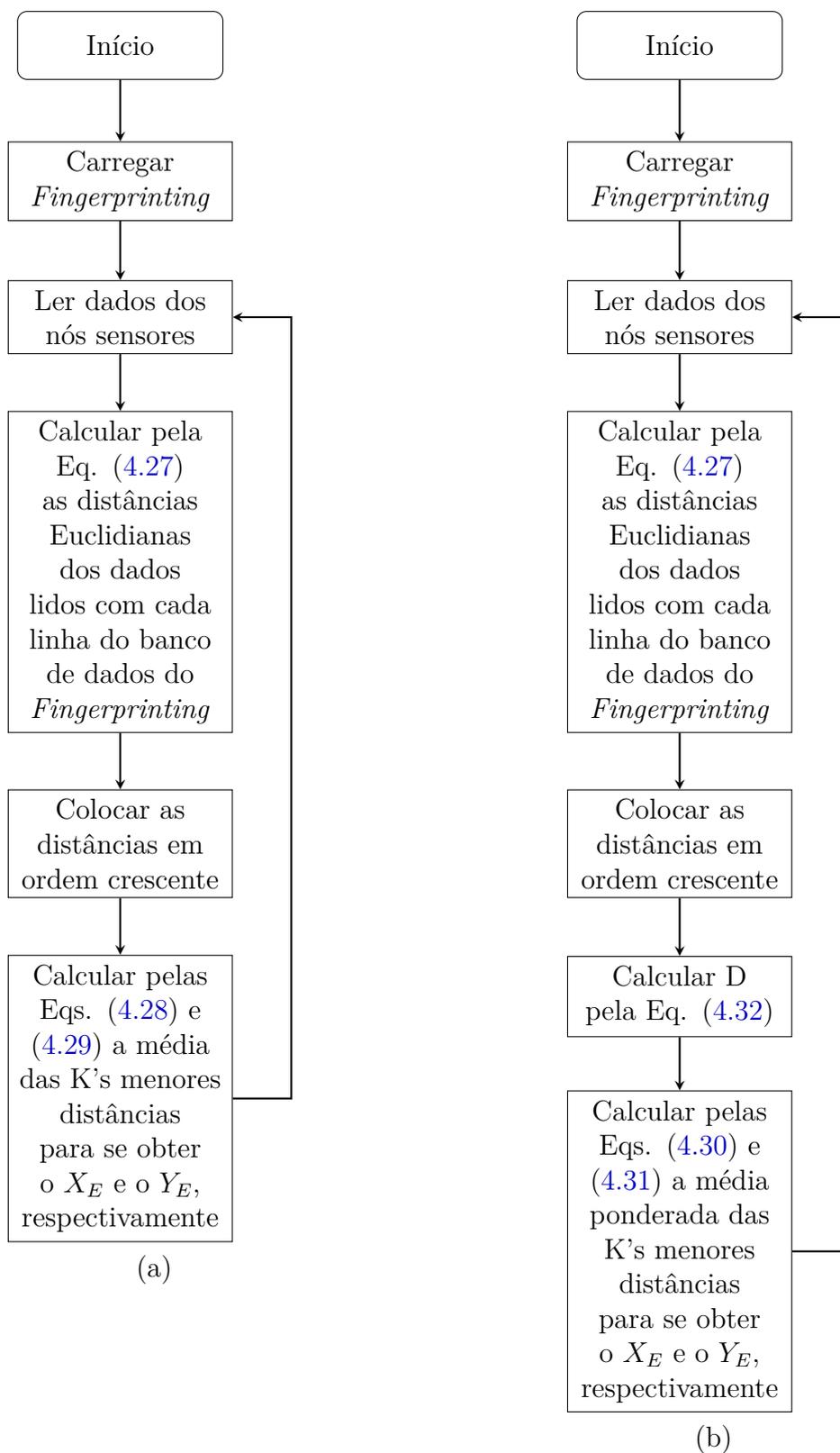
O instrumento virtual da fase *online* calcula a localização estimada a partir das medições realizadas em tempo real e tendo como base o *fingerprint* criado na fase *offline*. Uma captura da tela deste instrumento está apresentada na Figura 5.7. Nos gráficos ‘KNN’ e ‘WKNN’ são exibidos os pontos da localização estimada pelos métodos KNN e WKNN, respectivamente. Em ‘K’ o usuário insere o valor do K, valor dos vizinhos mais próximos utilizados pelos algoritmos dos dois métodos. Em ‘Medições (dBm)’ são exibidas as medições em dBm em cada nó, da mesma forma como ocorre no instrumento virtual da fase *offline*. O caminho do arquivo CSV do *fingerprint* a ser armazenado no computador é escolhido pelo usuário no código de programação em blocos do instrumento.

Figura 5.7 Captura da tela do instrumento virtual utilizado na fase *online*.

Fonte: Produzida pelo autor.

Nas Figuras 5.8(a) e 5.8(b) estão apresentados os fluxogramas para a estimação da localização com os métodos KNN e WKNN, respectivamente. O *script* do Matlab utilizado dentro do instrumento virtual executa os passos conforme os fluxogramas. No último passo, os dados de X_E e Y_E são repassados do *script* para o código do instrumento virtual e as informações são atualizadas na tela.

Figura 5.8 Fluxograma dos passos executados para estimação da localização com os métodos do (a) KNN e (b) WKNN.



Fonte: Produzida pelo autor.

5.4 Conclusões

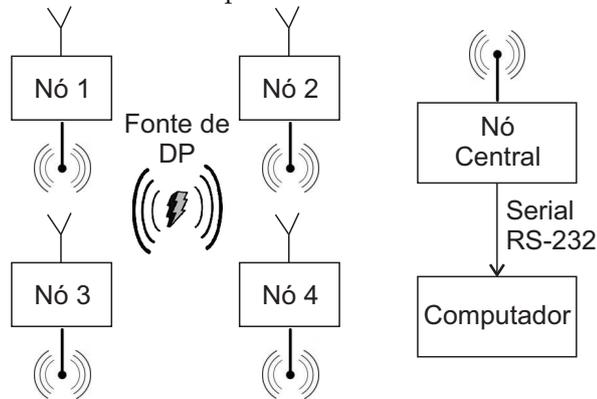
Foram apresentados neste capítulo a composição dos nós sensores para medição e aquisição dos dados, o sinal emulador de DP gerado para os testes e os instrumentos virtuais da fase *offline* e *online* para a aplicação do método do RSS *Fingerprinting*. No próximo capítulo, são apresentados os resultados e discussões dos testes do sistema de detecção e localização de descargas parciais em dois ambientes diferentes, onde todos os recursos apresentados no capítulo atual foram utilizados.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

Para validação do sistema foram montados quatro nós sensores para monitoramento de uma área envolvida por eles. Um diagrama de blocos com a representação de todo o sistema está apresentado na Figura 6.1, como também a representação de uma fonte de DP que pode estar em atividade dentro da área de monitoramento. Cada nó desta figura é composto pelos componentes do diagrama de blocos da Figura 5.1.

Figura 6.1 Diagrama de blocos representando todo o sistema e uma fonte de DP.



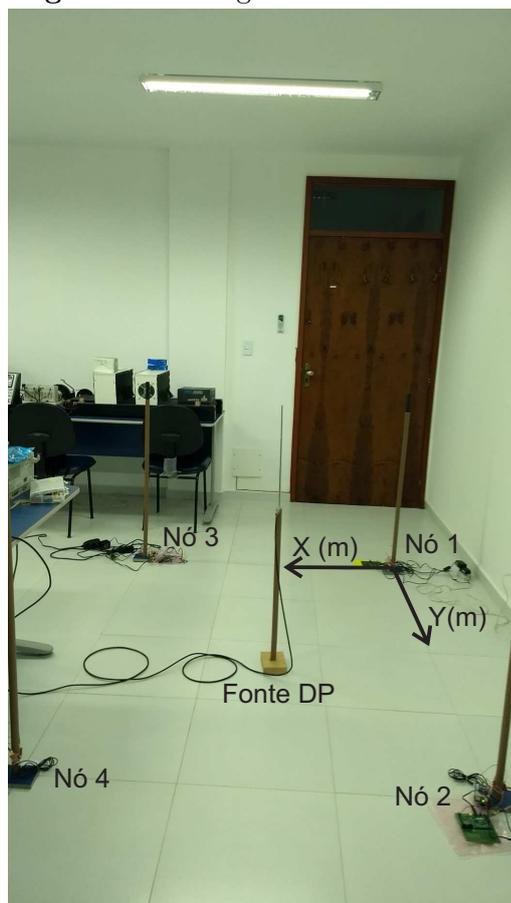
Fonte: Produzida pelo autor.

Em virtude deste trabalho utilizar a técnica do *RSS Fingerprinting*, no qual o mapeamento de rádio em um determinado ambiente é previamente realizado, optou-se aqui por executar os testes do sistema em dois ambientes. Assim, é possível realizar a validação em lugares onde a propagação do sinal eletromagnético terá diferentes comportamentos. Os ambientes são salas de laboratório fechadas, envolvidos por paredes e objetos. Nas seções seguintes estão detalhados os passos realizados para a criação do *fingerprint* e coleta de dados da estimativa de localização em tempo real, bem como os resultados e discussões.

6.1 Ambiente I

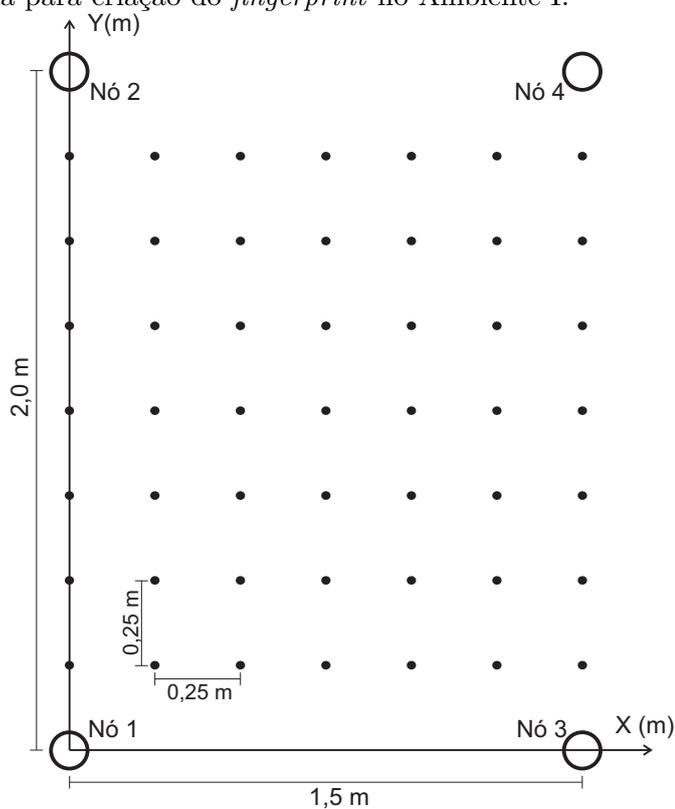
No primeiro ambiente os nós foram distribuídos seguindo-se o arranjo apresentado na fotografia da Figura 6.2, onde a disposição dos nós forma um retângulo. Dentro da área envolvida pelos nós situa-se a antena telescópica que irradiará o sinal RF para o *fingerprinting* (fase *offline*) e o sinal que emula uma fonte de DP no processo de localização (fase *online*). As antenas foram fixadas em um tubo de instalações hidráulicas e este em uma base de madeira. Na Figura 6.3 tem-se um esquema com maiores detalhes de como os nós sensores foram distribuídos, onde eles estão representados por círculos. O nó 1 está na origem do plano cartesiano de referência, o nó 2 está na posição $(X=0, Y=2)$ m, o nó 3 em $(X=1,5, Y=0)$ m e o nó 4 em $(X=1,5, Y=2)$ m. Na Figura 6.4 tem-se uma fotografia do computador executando o instrumento virtual e do gerador de RF utilizado nos testes.

Figura 6.2 Fotografia do Ambiente I.



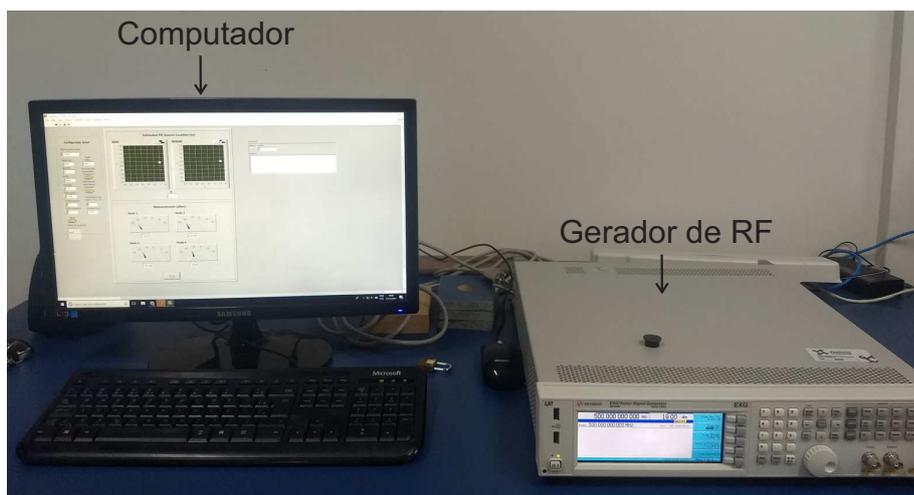
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.3 Distribuição dos nós sensores no plano cartesiano de referência e pontos para posicionamento da antena para criação do *fingerprint* no Ambiente I.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.4 Fotografia do computador executando o instrumento virtual e do gerador de RF utilizado.



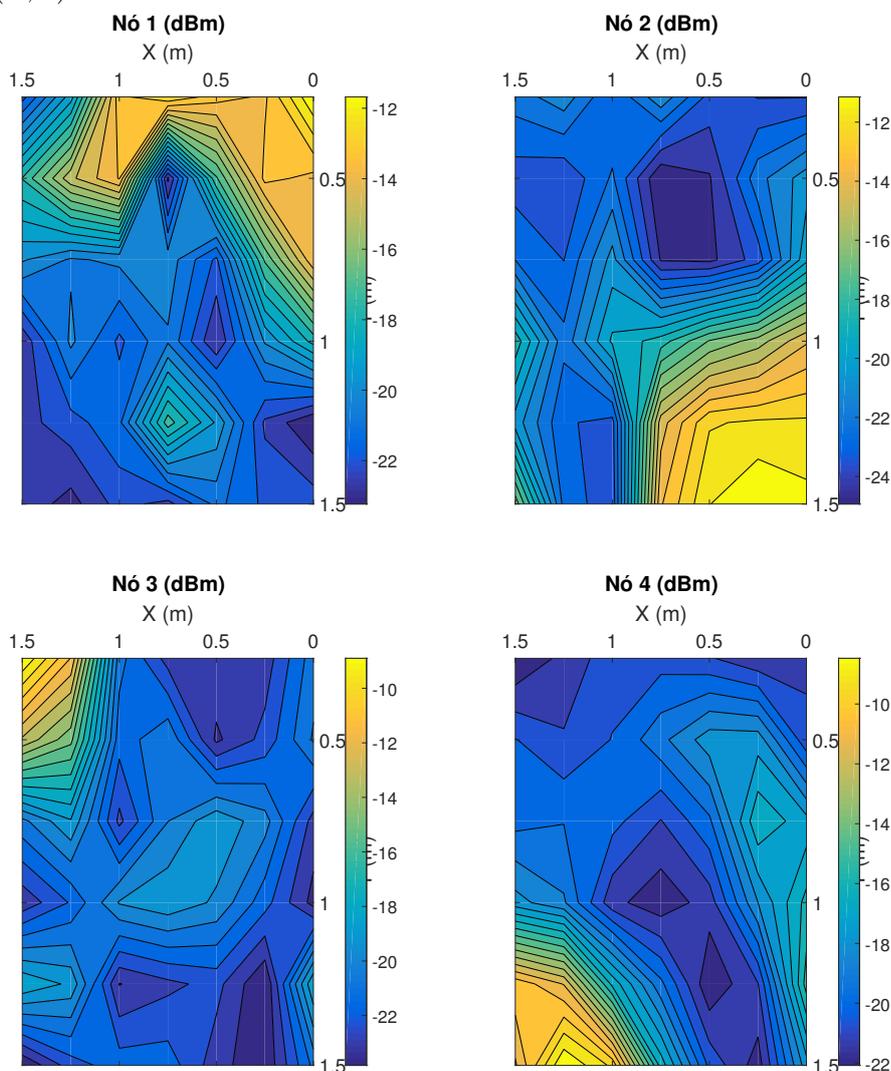
Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 6.5 tem-se um exemplo de como os nós sensores poderiam ser distribuídos em ambientes reais de monitoramento com maiores áreas. Os nós sensores podem ser replicados, sendo separados por uma distância a na vertical e uma distância b na horizontal. Os valores de a e b dependeriam da forma como os equipamentos a serem

a tensão de saída do detector RF dos quatro nós, associada à intensidade do sinal RF recebida por cada um deles, conforme uma linha do exemplo da Tabela 5.3. Após esse processo ser realizado para as 49 posições, o botão ‘Finalizar’ foi pressionado, finalizando-se a criação do *fingerprint* do ambiente.

Os gráficos de contorno da intensidade do sinal em dBm em função da posição (X,Y) da antena irradiadora do sinal RF, para cada um dos nós, estão apresentados na Figura 6.6. A partir destes gráficos, é possível verificar a intensidade medida por cada nó enquanto a antena percorreu todas as posições. De outra forma, é possível verificar como cada nó sensor mapeia o sinal eletromagnético no ambiente. As regiões formadas pelos contornos possuem diferentes intensidades identificadas por cores, cuja escala pode ser verificada nas barra laterais aos gráficos.

Figura 6.6 Gráfico de contorno da intensidade do sinal recebido em dBm de cada nó em função da posição (X,Y) da antena irradiadora do sinal RF no ambiente I.



Fonte: Produzida pelo autor.

É notório que a intensidade será mais elevada nas regiões mais próximas aos nós sensores, já que eles medirão uma maior intensidade quando a antena irradiadora estiver mais próxima a eles. Tomando como exemplo o nó 1, que está posicionado na origem do eixo de referência, a intensidade será mais elevada nas regiões mais próximas àquela posição. Quando a antena estiver mais distante ele medirá intensidades mais baixas do sinal. O mesmo efeito também acontece com os outros nós. Entretanto, em alguns casos, como nos nós 1 e 2, as regiões com intensidades mais elevadas cobrem uma maior área em relação aos nós 3 e 4. Isso se explica pelo comportamento do sinal eletromagnético no ambiente, em que reflexões, cancelamentos, absorções, dentre outros fenômenos, irão ocorrer. Dessa forma, cada nó, em função de sua posição, terá um diferente mapeamento do sinal no ambiente. Esse mapeamento fica registrado no *fingerprint* e é levado em consideração pelo algoritmo de estimação da localização em tempo real.

6.1.2 Testes de Localização

Após a criação do *fingerprint*, utilizou-se o instrumento virtual da fase *online*, o qual foi construído para estimar a localização de uma fonte de DP. Na janela do LabVIEW onde é realizada a programação do instrumento, foi inserido o caminho do arquivo que armazena os dados do *fingerprint* do ambiente. Em seguida, a função *Sweep* do gerador de RF foi configurado para emitir pulsos de 500 MHz, de forma a realizar a emulação do sinal de DP descrita no capítulo anterior (Figura 5.5). A antena telescópica ainda conectada ao gerador foi colocada em 12 posições diferentes, com o intuito de verificar se a localização da fonte emuladora de DP, estimada pelo instrumento virtual, era próxima da real. As localizações reais e as estimadas pelos métodos KNN e WKNN foram registradas e estão listadas na Tabela 6.1, onde X_R e Y_R são as coordenadas das localizações reais da fonte de DP, X_{KNN} e Y_{KNN} são as coordenadas das localizações estimadas pelo método KNN e, X_{WKNN} e Y_{WKNN} são as coordenadas das localizações estimadas pelo método WKNN. O valor de K pode ser ajustado empiricamente [86] e neste ambiente os melhores resultados foram alcançados quando o valor da variável foi ajustado para 2.

No sentido de identificar qual método teve maior precisão no conjunto de dados da Tabela 6.1, foi utilizado o método do MEE (*Mean Estimation Error*) [86]. O MEE é definido pela Equação (6.1), de onde calcula-se a média do somatório das distâncias Euclidianas, entre as localizações estimadas e as reais, de uma quantidade de medidas tomadas. Na equação, $(X_{E,i}, Y_{E,i})$ e $(X_{R,i}, Y_{R,i})$ são as coordenadas das localizações estimadas e reais, respectivamente, e N é a quantidade de medidas utilizadas no cálculo. O resultados do MEE para os métodos do KNN e WKNN estão listados na Tabela 6.2. Conforme esperado, o método do WKNN apresentou um melhor resultado.

Tabela 6.1 Localizações reais da fonte emuladora de DP e localizações estimadas pelos métodos KNN e WKNN nos testes no ambiente I.

X_R	Y_R	X_{KNN}	Y_{KNN}	X_{WKNN}	Y_{WKNN}
0,000	0,500	0,500	0,375	0,387	0,403
0,500	0,500	0,750	0,875	0,615	0,673
1,000	0,500	1,000	0,375	1,000	0,356
1,500	0,500	0,875	0,750	0,924	0,750
0,000	1,000	0,125	1,000	0,087	1,000
0,500	1,000	0,750	1,000	0,765	1,000
1,000	1,000	0,875	1,000	0,893	1,000
1,500	1,000	1,250	1,125	1,259	1,120
0,000	1,500	0,000	1,375	0,000	1,374
0,500	1,500	0,625	1,625	0,632	1,632
1,000	1,500	1,375	1,625	1,394	1,644
1,500	1,500	1,125	1,500	1,176	1,500

Fonte: Produzida pelo autor.

$$MEE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(X_{E,i} - X_{R,i})^2 + (Y_{E,i} - Y_{R,i})^2} \quad (6.1)$$

Tabela 6.2 MEE obtido com os testes no ambiente I para os métodos KNN e WKNN.

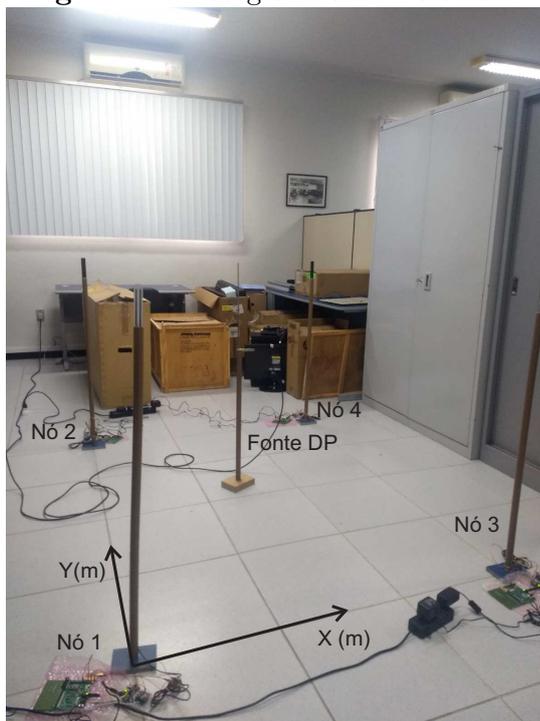
Método	MEE (m)
KNN	0,301
WKNN	0,264

Fonte: Produzida pelo autor.

6.2 Ambiente II

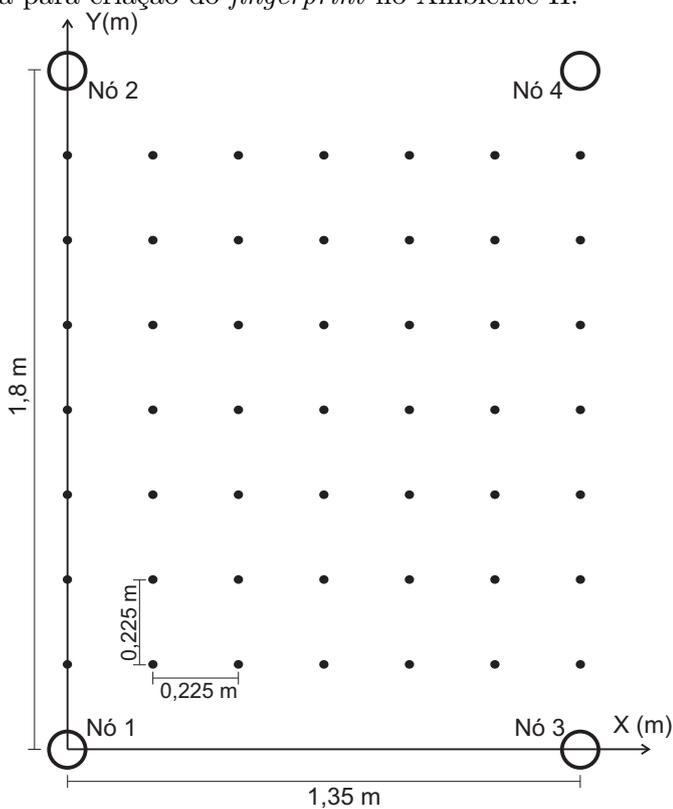
Em outro ambiente de laboratório, os nós sensores foram distribuídos seguindo-se o padrão da fotografia da Figura 6.7. Na Figura 6.8 tem-se um esquema com maiores detalhes de como os nós sensores foram distribuídos. Em relação ao ambiente I, existe uma pequena diferença no posicionamento dos nós. O nó 1 está na origem do plano cartesiano de referência, o nó 2 está na posição ($X=0$, $Y=1,8$) m, o nó 3 em ($X=1,35$, $Y=0$) m e o nó 4 em ($X=1,35$, $Y=1,8$) m.

Figura 6.7 Fotografia do Ambiente II.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 6.8 Distribuição dos nós sensores no plano cartesiano de referência e pontos para posicionamento da antena para criação do *fingerprint* no Ambiente II.



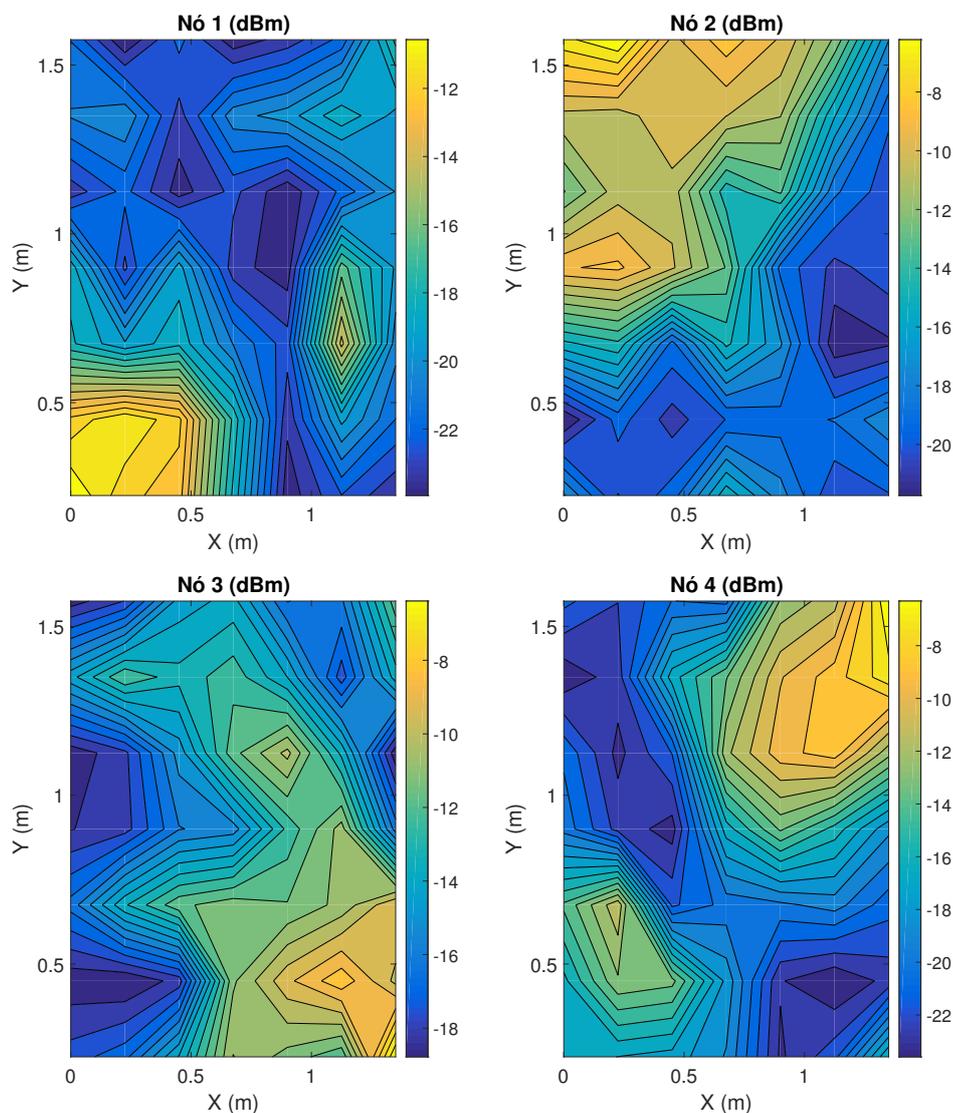
Fonte: Produzida pelo autor.

6.2.1 *Fingerprinting* do Ambiente

No processo de *fingerprinting* também foram escolhidos 49 pontos igualmente espaçados para geração do sinal RF, estando eles demarcados na Figura 6.8. A separação entre os pontos neste ambiente é feita por uma distância de 0,225 m na horizontal e na vertical.

Os gráficos de contorno para o ambiente II estão apresentados na Figura 6.9. Da mesma forma que no ambiente anterior, a intensidade medida por cada nó é maior quando a antena com o sinal RF está mais próxima a eles. Entretanto, verifica-se por meio dos gráficos que o comportamento do sinal se difere em relação ao ambiente I, visto que a reposita do ambiente à propagação do sinal ocorrerá de maneira diferente.

Figura 6.9 Gráfico de contorno da intensidade do sinal recebido em dBm de cada nó em função da posição (X,Y) da antena irradiadora do sinal RF no ambiente II.



Fonte: Produzida pelo autor.

6.2.2 Testes de Localização

Assim como no ambiente anterior, para a fase *online* também foram escolhidos 12 pontos, de forma a avaliar a estimação da localização do algoritmo com os métodos KNN e WKNN. Neste ambiente os melhores resultados também foram alcançados quando o valor de K foi ajustado para 2. Os resultados de localização obtidos dos algoritmos estão listados na Tabela 6.3, enquanto que os resultados do MEE estão listados na Tabela 6.4. Ainda que os resultados do MEE estejam próximos, neste ambiente o método do KNN teve uma precisão ligeiramente maior.

Tabela 6.3 Localizações reais da fonte emuladora de DP e localizações estimadas pelos métodos KNN e WKNN nos testes no ambiente II.

X_R	Y_R	X_{KNN}	Y_{KNN}	X_{WKNN}	Y_{KNN}
0,000	0,450	0,338	0,338	0,348	0,348
0,450	0,450	0,338	0,225	0,324	0,225
0,900	0,450	0,900	0,338	0,900	0,335
1,350	0,450	1,125	0,450	1,132	0,450
0,000	0,900	0,338	1,012	0,419	0,985
0,450	0,900	0,225	0,450	0,181	0,494
0,900	0,900	0,788	1,012	0,734	1,066
1,350	0,900	1,125	0,900	1,170	0,900
0,000	1,350	0,112	1,575	0,141	1,575
0,450	1,350	0,562	1,350	0,556	1,350
0,900	1,350	0,562	1,012	0,543	0,993
1,350	1,350	1,238	1,238	1,282	1,282

Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 6.4 MEE obtido com os testes no ambiente II para os métodos KNN e WKNN.

Método	MEE (m)
KNN	0,266
WKNN	0,271

Fonte: Produzida pelo autor.

6.3 Conclusões

Os resultados e discussões para os testes realizados em dois ambientes foram apresentados neste capítulo. Nos dois ambientes, o *fingerprinting* foi gerado através do registro da intensidade medida por cada nó sensor quando a antena irradiadora do sinal RF foi colocada em 49 posições. Para os testes de localização, a antena emissora do sinal emulador de DP foi colocada em 12 diferentes posições. Os resultados obtidos com o método do KNN e WKNN foram registrados para o cálculo do MEE. Os dados desse último parâmetro foram satisfatórios e atestam que com devidas melhorias a serem consideradas, o

sistema pode ser utilizado para a detecção e localização de DP. O capítulo a seguir contém as considerações finais, incluindo as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Conclusões

Monitorar o estado do isolamento de equipamentos dos sistemas elétricos de potência, é uma atividade fundamental a ser executada pelas equipes de manutenção. Falhas nestes equipamentos podem interromper o fornecimento de energia em regiões, causando a insatisfação dos clientes, interrupção da atividade econômica, perda do equipamento, como também a imposição de multas pelas agências reguladoras. A ocorrência de descargas parciais pode estar relacionada à falhas no isolamento. De forma a evitar a ruptura total do isolamento e uma consequente interrupção do fornecimento de energia, a atividade de descargas parciais pode ser monitorada para verificar se o equipamento deve ser retirado e substituído para manutenção.

Levando em consideração as consequências dos problemas de falhas do isolamento, nesta dissertação de mestrado foi proposto um sistema *online* de detecção e localização de descargas parciais com rede de sensores sem fio. O sistema pode ser considerado como de baixo custo não apenas quando comparado a outros sistemas de detecção de descargas parciais, mas também quando comparado ao valor dos ativos que serão monitorados.

Comparando-se ainda com outras técnicas de localização que se apropriam do sinal RF irradiado pelas descargas, a técnica utilizada aqui, no qual estima a localização a partir da intensidade do sinal recebido nas antenas, é de implementação mais simples e de menor custo em relação às técnicas que utilizam o tempo de chegada do sinal (TOA), a diferença do tempo de chegada do sinal (TDOA) e direção de chegada do sinal (DOA). Outras vantagens associadas aos sistemas que utilizam o sinal RF, é a detecção das descargas sem a necessidade de conexões elétricas aos barramentos de alta tensão e o monitoramento dos equipamentos de uma determinada área, não apenas de um equipamento individual.

O uso da rede de sensores sem fio possibilita a eliminação dos cabos de comunicação dos nós sensores dentro do ambiente de alta tensão. Outra ferramenta utilizada neste trabalho são os instrumentos virtuais. Desenvolvidos no LabVIEW, eles criam o

fingerprint da intensidade do sinal em um ambiente, executa os algoritmos para estimação da localização e retorna estes resultados, além de que são personalizáveis. A coleta de dados pelo instrumento é feita de forma simplificada, sem a necessidade de interfaces de aquisição de dados de custo mais elevados, sendo realizada apenas utilizando a porta de comunicação serial já integrada aos computadores.

Ainda que o sistema proposto esteja em uma fase inicial e não tenha sido testado em um ambiente real, os resultados são encorajadores para que melhorias em trabalhos futuros sejam consideradas. As localizações estimadas pelos métodos do KNN e WKNN tiveram precisão suficiente para que a região onde existe uma fonte de DP seja localizada. Em ambientes reais com maiores áreas, mais nós sensores podem ser replicados e distribuídos para que toda a área possa ser monitorada.

No ambiente de laboratório, onde o sistema foi testado, ocorre basicamente a reflexão e cancelamentos do sinal RF, causado por paredes e objetos. Em um ambiente real, como em uma subestação, por exemplo, o sinal RF não só será refletido, mas também podem ocorrer absorções por superfícies metálicas de equipamentos, resultando em um comportamento diferente da propagação do sinal eletromagnético. Levando esses fatos em consideração, a técnica do RSS *Fingerprinting* é favorável, uma vez que o comportamento da propagação do sinal é registrado no banco de dados do *fingerprint* e será considerado pelo algoritmo para estimativa de localização. As técnicas que utilizam apenas a intensidade do sinal (RSS), sem considerar o *fingerprint*, podem trazer erros maiores, já que o comportamento do sinal eletromagnético no ambiente não será utilizado pelo algoritmo.

Neste trabalho, foi considerado um pulso de DP de 500 MHz, uma vez que o detector RF tem comportamento diferente para diferentes frequências e o foco principal era a validação do algoritmo de localização. Os coeficientes do polinômio característico que retorna a intensidade do sinal em dBm usando a tensão CC como entrada, foram modelados apenas para 500 MHz. Nos trabalhos futuros, os coeficientes de polinômios para diferentes faixas de frequências devem ser modelados, assim como o *fingerprint*. Um circuito adicional para detecção da frequência do sinal deve ser incluído em cada nó. Com os dados de frequência, o algoritmo deve escolher o polinômio e o *fingerprint* mais apropriado. Se o procedimento for realizado para toda a faixa de frequência em que o sinal RF gerado pela DP concentra maior energia, o sistema estaria apto para detecção de DP em diferentes intervalos. Outro item importante a ser considerado em trabalhos futuros é o reconhecimento simultâneo de diferentes fontes de DP.

7.2 Trabalhos Futuros

Para melhoria do sistema de detecção e localização de descargas parciais, estão descritas a seguir algumas propostas para trabalhos futuros:

-
- Tornar o sistema apto a atuar em toda a faixa de frequência em que o sinal RF irradiado pelas DP's concentram maior energia;
 - Possibilitar que o sistema detecte simultaneamente diferentes fontes de DP;
 - Fazer com que o sistema tenha capacidade de distinguir entre sinais RF gerados pela DP e sinais RF gerados por interferências e transientes, que podem ser resultantes, por exemplo, de um processo de manobra ou chaveamento;
 - Aprimorar a interface dos instrumentos virtuais para uma melhor interação com o usuário, bem como tornar mais eficientes os códigos de programação dos instrumentos;
 - Utilizar algoritmos de localização com redes neurais, de forma a aumentar a precisão da estimação da localização de DP;
 - Projetar e construir antenas mais adequadas para a faixa de frequência do sinal irradiado pela DP.

Referências Bibliográficas

- [1] B. Sarkar, C. Koley, N. Roy, e P. Kumbhakar, “Condition monitoring of high voltage transformers using fiber bragg grating sensor,” *Measurement*, vol. 74, pp. 255 – 267, 2015.
- [2] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, A. H. A. Bakar, e H. Mokhlis, “Partial discharge classifications: Review of recent progress,” *Measurement*, vol. 68, pp. 164 – 181, 2015.
- [3] M. D. Judd, L. Yang, e I. B. B. Hunter, “Partial discharge monitoring of power transformers using uhf sensors. part i: sensors and signal interpretation,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, no. 2, pp. 5–14, March 2005.
- [4] D. A. Nattrass, “Partial discharge measurement and interpretation,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 10–23, May 1988.
- [5] A. A. Bajwa, S. Habib, e M. Kamran, “An investigation into partial discharge pulse extraction methods,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 964 – 982, 2015.
- [6] A. Cavallini, G. C. Montanari, A. Contin, e F. Pulletti, “A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on pd signal inference,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 23–30, March 2003.
- [7] A. A. Mas’ud, B. Stewart, e S. McMeekin, “Application of an ensemble neural network for classifying partial discharge patterns,” *Electric Power Systems Research*, vol. 110, pp. 154 – 162, 2014.
- [8] A. R. Mor, L. C. Heredia, e F. Muñoz, “Effect of acquisition parameters on equivalent time and equivalent bandwidth algorithms for partial discharge clustering,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 88, pp. 141 – 149, 2017.
- [9] B. Danouj, S. Tahan, e E. David, “Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection,” *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 660 – 666, 2013.

-
- [10] I. E. Portugues, P. J. Moore, I. A. Glover, C. Johnstone, R. H. McKosky, M. B. Goff, e L. van der Zel, "Rf-based partial discharge early warning system for air-insulated substations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 20–29, Jan 2009.
- [11] M. D. Judd, "Radiometric partial discharge detection," in *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, April 2008, pp. 1025–1030.
- [12] Y. Zhang, D. Upton, A. Jaber, H. Ahmed, U. Khan, B. Saeed, P. Mather, P. Lazaridis, R. Atkinson, M. F. Q. Vieira, e I. A. Glover, "Multiple source localization for partial discharge monitoring in electrical substation," in *2015 Loughborough Antennas Propagation Conference (LAPC)*, Nov 2015, pp. 1–4.
- [13] X. He, G. Xie, e Y. Jiang, "Online partial discharge detection and location system using wireless sensor network," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 420 – 428, 2011.
- [14] Y. Zhang, D. Upton, A. Jaber, H. Ahmed, B. Saeed, P. Mather, P. Lazaridis, A. Mopty, C. Tachtatzis, R. Atkinson, M. Judd, M. de Fatima Queiroz Vieira, e I. Glover, "Radiometric wireless sensor network monitoring of partial discharge sources in electrical substations," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 9, p. 438302, 2015.
- [15] E. Fadel, V. Gungor, L. Nassef, N. Akkari, M. A. Malik, S. Almasri, e I. F. Akyildiz, "A survey on wireless sensor networks for smart grid," *Computer Communications*, vol. 71, pp. 22 – 33, 2015.
- [16] "IEC 60270, High-voltage test techniques - partial discharge measurements," International Electrotechnical Commission, Geneve, Switzerland., Standard, 2000.
- [17] M. Majidi e M. Oskuoee, "Improving pattern recognition accuracy of partial discharges by new data preprocessing methods," *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 100 – 110, 2015.
- [18] G. C. Stone, "Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 5, pp. 891–904, Oct 2005.
- [19] S. A. Boggs, "Partial discharge: overview and signal generation," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 33–39, July 1990.
- [20] J. H. Mason, "Enhancing the significance of pd measurements," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 5, pp. 876–888, Oct 1995.

-
- [21] J. M. R. de Souza Neto, *Localização de Descargas Parciais Baseada em um Método Radiométrico - Prova do Princípio*. Campina Grande, PB: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2014, tese (Doutorado em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento da Informação).
- [22] E. C. T. de Macêdo, *Metodologia Para a Classificação de Descargas Parciais Utilizando Redes Neurais Artificiais*. Campina Grande, PB: Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2014, tese (Doutorado em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento da Energia).
- [23] G. M. Hashmi, *Partial Discharge Detection for Condition Monitoring of Covered-Conductor Overhead Distribution Networks Using Rogowski Coil*. Helsinki University of Technology, Faculty of Electronics, Communications and Automation, Department of Electrical Engineering, 2008, .Doctoral Dissertation.
- [24] H. Zhang, *Advanced Techniques Application of On-line Partial Discharge Detection In Power Cables*. Australia: School of Electrical Engineering and Telecommunications, The University of New South Wales, 2006, .PHD thesis.
- [25] A. Gemant e W. Philippoff, “Die funkenstrecke mit vorkondensator,” *Z.f.Physik*, vol. 9, no. 13, pp. 425–430, 1932.
- [26] A. Pedersen, I. Mcallister, G. Crichton, e S. Vibholm, “Formulation of the streamer breakdown criterion and its application to strongly electronegative gases and gas mixtures,” *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 67, no. 6, pp. 395–402, 1984.
- [27] E. Lemke, “A critical review of partial-discharge models,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 6, pp. 11–16, Nov 2012.
- [28] A. Eigner e K. Rethmeier, “An overview on the current status of partial discharge measurements on ac high voltage cable accessories,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 32, no. 2, pp. 48–55, March 2016.
- [29] M. Hikita, M. Kozako, H. Takada, M. Higashiyama, T. Hirose, S. Nakamura, e T. Umemura, “Partial discharge phenomena in artificial cavity in epoxy cast resin insulation system,” in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, June 2010, pp. 1–5.
- [30] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M. H. Samimi, e M. Siegel, “Diagnostic measurements for power transformers,” *Energies*, vol. 9, no. 5, 2016.
- [31] I. J. Kemp, “Partial discharge plant-monitoring technology: present and future developments,” *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 142, no. 1, pp. 4–10, Jan 1995.

-
- [32] M. M. Yaacob, M. A. Alsaedi, J. R. Rashed, A. M. Dakhil, e S. F. Atyah, “Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors,” *Photonic Sensors*, vol. 4, no. 4, pp. 325–337, 2014.
- [33] B. A. Castro, G. A. M. Clerice, A. L. Andreoli, F. de Souza Campos, e J. A. C. Ulson, “A low cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by piezolectric sensor,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3225–3231, July 2016.
- [34] A. Jaber, P. Lazaridis, Y. Zhang, D. Upton, H. Ahmed, U. Khan, B. Saeed, P. Mather, M. F. Q. Vieira, R. Atkinson, M. Judd, e I. A. Glover, “Comparison of contact measurement and free-space radiation measurement of partial discharge signals,” in *2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Sept 2015, pp. 1–4.
- [35] A. Mukhtaruddin, M. Isa, M. R. Adzman, S. I. S. Hasan, M. N. K. H. Rohani, e C. C. Yii, “Techniques on partial discharge detection and location determination in power transformer,” in *2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED)*, Aug 2016, pp. 537–542.
- [36] A. Rodrigo, P. Llovera, V. Fuster, e A. Quijano, “Study of partial discharge charge evaluation and the associated uncertainty by means of high frequency current transformers,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 2, pp. 434–442, April 2012.
- [37] F. Álvarez, F. Garnacho, J. Ortego, e M. Á. Sánchez-Urán, “Application of hfct and uhf sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment,” *Sensors*, vol. 15, no. 4, pp. 7360–7387, 2015.
- [38] C. Zachariades, R. Shuttleworth, R. Giussani, e R. MacKinlay, “Optimization of a high-frequency current transformer sensor for partial discharge detection using finite-element analysis,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 20, pp. 7526–7533, Oct 2016.
- [39] M. V. R. Moreno, G. Robles, R. Albarracín, J. A. Rey, e J. M. M. Tarifa, “Study on the self-integration of a rogowski coil used in the measurement of partial discharges pulses,” *Electrical Engineering*, vol. 99, no. 3, pp. 817–826, Sep 2017.
- [40] M. Argüeso, G. Robles, e J. Sanz, “Implementation of a rogowski coil for the measurement of partial discharges,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, no. 6, p. 065107, 2005.
- [41] A. J. Reid, M. D. Judd, R. A. Fouracre, B. G. Stewart, e D. M. Hepburn, “Simultaneous measurement of partial discharges using iec and radio-frequency techniques,”

-
- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 444–455, April 2011.
- [42] S. Tenbohlen, A. Pfeffer, e S. Coenen, “On-site experiences with multi-terminal iec pd measurements, uhf pd measurements and acoustic pd localisation,” in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, June 2010, pp. 1–5.
- [43] “IEC 62478, High-voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods,” Geneve, Switzerland., 2016.
- [44] M. D. Judd, “Experience with uhf partial discharge detection and location in power transformers,” in *2011 Electrical Insulation Conference (EIC).*, June 2011, pp. 201–205.
- [45] J. M. R. de Souza Neto, E. C. T. de Macedo, T. C. M. Cavalcanti, E. C. Guedes, J. S. da Rocha Neto, e I. A. Glover, “Development of a partial discharge emulator for calibration of a radiometric pd detection system,” in *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, May 2012, pp. 2398–2403.
- [46] J. M. Neto, Y. Zhang, A. Jaber, M. Zhu, M. Judd, R. Atkinson, J. Soraghan, J. S. Neto, M. de Fatima Q Vieira, e I. A. Glover, “Radiometric location of partial discharge sources for the future smart grid,” in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, Aug 2014, pp. 1–4.
- [47] A. Hekmati, “Proposed method of partial discharge allocation with acoustic emission sensors within power transformers,” *Applied Acoustics*, vol. 100, pp. 26 – 33, 2015.
- [48] T. T. C. Palitó, *Detecção Acústica de Descargas Parciais com Transdutor Piezoelétrico*. São Carlos, SP: Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015, dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência).
- [49] J. S. Pearson, O. Farish, B. F. Hampton, M. D. Judd, D. Templeton, B. W. Pryor, e I. M. Welch, “Partial discharge diagnostics for gas insulated substations,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 5, pp. 893–905, Oct 1995.
- [50] M. Muhr e R. Schwarz, “Partial discharge measurement as a diagnostic tool for hv-equipments,” in *2006 IEEE 8th International Conference on Properties applications of Dielectric Materials*, June 2006, pp. 195–198.

-
- [51] S. Coenen e S. Tenbohlen, “Location of pd sources in power transformers by uhf and acoustic measurements,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 1934–1940, December 2012.
- [52] S. M. Hoek, M. Krüger, S. Körber, e A. Kraetge, “Application of the uhf technology to detect and locate partial discharges in liquid immersed transformer,” *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 131, no. 8, pp. 386–392, 2014.
- [53] Y. Li, J. Du, J. Gao, X. Zhang, T. Liu, G. Wang, R. Li, Z. Liu, e J. Wang, “Classification of partial discharge under different voltages using acoustic emission techniques,” in *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, June 2013, pp. 121–124.
- [54] W. Sikorski, K. Siodla, H. Moranda, e W. Ziomek, “Location of partial discharge sources in power transformers based on advanced auscultatory technique,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 1948–1956, December 2012.
- [55] H. R. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach, M. Zanjani, e K. Miralikhani, “A novel method for ultra-high-frequency partial discharge localization in power transformers using the particle swarm optimization algorithm,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, no. 2, pp. 26–39, March 2013.
- [56] H. R. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach, e K. Miralikhani, “Advancing new techniques for uhf pddetection and localization in the power transformers in the factory tests,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 1, pp. 448–455, Feb 2015.
- [57] H. R. Mirzaei, A. Akbari, M. Zanjani, K. Miralikhani, E. Gockenbach, e H. Borsi, “Investigating suitable positions in power transformers for installing uhf antennas for partial discharge localization,” in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Sept 2012, pp. 625–628.
- [58] H.-L. Liu, “Acoustic partial discharge localization methodology in power transformers employing the quantum genetic algorithm,” *Applied Acoustics*, vol. 102, pp. 71 – 78, 2016.
- [59] P. J. Moore, I. E. Portugues, e I. A. Glover, “Radiometric location of partial discharge sources on energized high-voltage plant,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 2264–2272, July 2005.
- [60] H. H. Sinaga, B. T. Phung, e T. R. Blackburn, “Partial discharge localization in transformers using uhf detection method,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 6, pp. 1891–1900, December 2012.

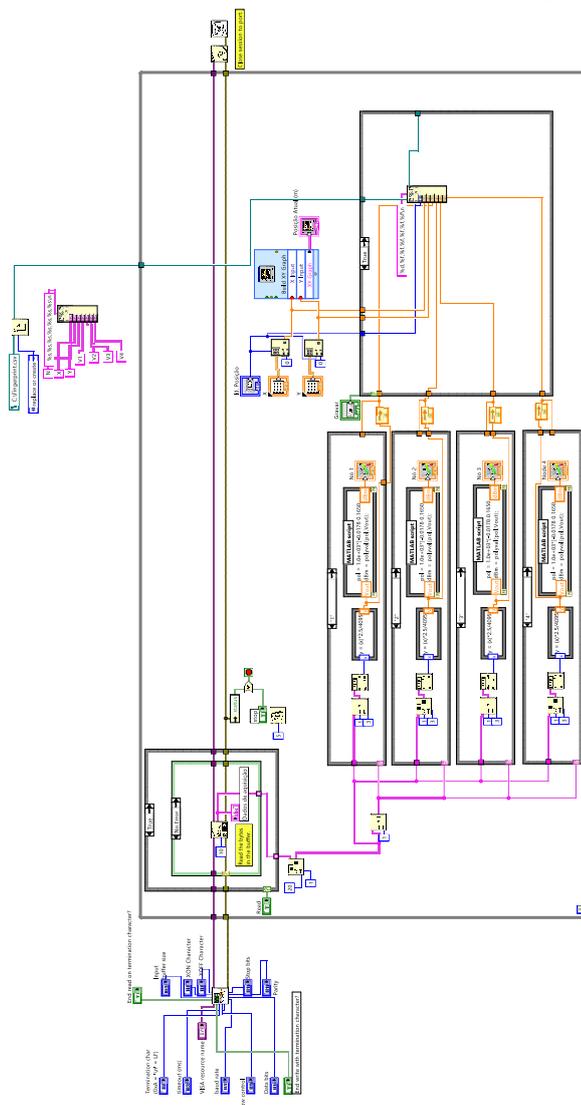
-
- [61] G. Robles, J. M. Fresno, M. Sánchez-Fernández, e J. M. Martínez-Tarifa, “Antenna deployment for the localization of partial discharges in open-air substations,” *Sensors*, vol. 16, no. 4, 2016.
- [62] F. Polak, W. Sikorski, e K. Siodla, “Location of partial discharges sources using sensor arrays,” in *2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Sept 2014, pp. 1–4.
- [63] F. Predl, W. Guo, S. Hoek, e M. Krüger, “Combining acoustic and electrical methods to locate partial discharge in a power transformer,” in *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, July 2015, pp. 424–427.
- [64] M. Mondal e G. B. Kumbhar, “A technique based on an archimedean copula for the localization of partial discharge in a transformer winding,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 5, pp. 2908–2916, October 2016.
- [65] Y. Tian, B. Qi, R. Zhuo, M. Fu, e C. Li, “Locating partial discharge source occurring on transformer bushing by using the improved tdoa method,” in *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Sept 2016, pp. 144–147.
- [66] B. G. Stewart, A. Nesbitt, e L. Hall, “Triangulation and 3d location estimation of rfi and partial discharge sources within a 400kv substation,” in *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, May 2009, pp. 164–168.
- [67] H. Hou, G. Sheng, e X. Jiang, “Robust time delay estimation method for locating uhf signals of partial discharge in substation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1960–1968, July 2013.
- [68] E. T. Iorkyase, C. Tachtatzis, R. C. Atkinson, e I. A. Glover, “Localisation of partial discharge sources using radio fingerprinting technique,” in *2015 Loughborough Antennas Propagation Conference (LAPC)*, Nov 2015, pp. 1–5.
- [69] W. Zhang, K. Bi, Z. Li, L. Luo, G. Sheng, e X. Jiang, “Rssi fingerprinting-based uhf partial discharge localization technology,” in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Oct 2016, pp. 1364–1367.
- [70] J. M. R. de Souza Neto, E. C. T. de Macedo, M. L. N. Batista, T. C. M. Cavalcanti, E. C. Guedes, J. S. da Rocha Neto, e I. A. Glover, “Early progress in the development of a radiometric pd location system,” in *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, May 2012, pp. 129–133.
- [71] J. M. R. de Souza Neto, J. S. da Rocha Neto, L. Chang, R. Atkinson, K. Sasloglou, e I. A. Glover, “A self-calibrating partial discharge wsn for condition monitoring in

-
- the future smart grid,” in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Oct 2012, pp. 1–7.
- [72] J. M. R. de Souza Neto, J. S. d. Rocha Neto, E. C. T. Macedo, I. A. Glover, e M. D. Judd, “An envelope detector as a trading cost technique for radiometric partial discharge detection,” in *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, May 2014, pp. 1584–1589.
- [73] J. M. Neto, Y. Zhang, A. Jaber, M. Zhu, M. Judd, R. Atkinson, J. Soraghan, J. S. Neto, M. de Fatima Q Vieira, e I. A. Glover, “Radiometric location of partial discharge sources for the future smart grid,” in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, Aug 2014, pp. 1–4.
- [74] Q. Shan, I. Glover, P. Moore, I. Portugues, M. Judd, R. Rutherford, e R. J. Watson, “Impulsive noise environment of high voltage electricity transmission substations and its impact on the performance of zigbee,” August 2008.
- [75] P. Kakeeto, M. Judd, J. Pearson, e D. Templeton, “Experimental investigation of positional accuracy for uhf partial discharge location,” in *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, April 2008, pp. 1070–1073.
- [76] R. Sarathi, I. P. M. Sheema, e V. Subramanian, “Propagation of partial discharge signals and the location of partial discharge occurrences,” in *2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems*, Dec 2013, pp. 92–95.
- [77] O. E. Mountassir, B. G. Stewart, A. J. Reid, e S. G. McMeekin, “Quantification of the performance of iterative and non-iterative computational methods of locating partial discharges using {RF} measurement techniques,” *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 110 – 120, 2017.
- [78] W. M. F. Al-Masri, M. F. Abdel-Hafez, e A. El-Hag, “A multi-hypothesis sequential probability test for partial discharges localization in power transformers,” in *2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*, Dec 2015, pp. 1–6.
- [79] K. Sohraby, D. Minoli, e T. Znati, *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. Wiley Telecom.
- [80] M. Sultana, S. R. Mahmud, L. Ansari, e N. A. Khan, “Delaunay triangulation and st-numbering in wireless sensor network topology,” in *2014 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology*, April 2014, pp. 1–7.
- [81] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Burlington: Newnes, 2008.

-
- [82] A. Wheeler, "Commercial applications of wireless sensor networks using zigbee," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 4, pp. 70–77, April 2007.
- [83] F. M. Sallabi, A. M. Gaouda, A. H. El-Hag, e M. M. A. Salama, "Evaluation of zigbee wireless sensor networks under high power disturbances," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 13–20, Feb 2014.
- [84] J. Jia e J. Meng, "Partial discharge impulsive noise in electricity substations and the impact on 2.4 ghz and 915 mhz zigbee communications," in *2013 IEEE Power Energy Society General Meeting*, July 2013, pp. 1–5.
- [85] N. B. Sarr, H. Boeglen, B. L. Agba, F. Gagnon, e R. Vauzelle, "Partial discharge impulsive noise in 735 kv electricity substations and its impacts on 2.4 ghz zigbee communications," in *2016 International Conference on Selected Topics in Mobile Wireless Networking (MoWNeT)*, April 2016, pp. 1–7.
- [86] X. Liang, X. Gou, e Y. Liu, "Fingerprint-based location positoning using improved knn," in *2012 3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, Sept 2012, pp. 57–61.

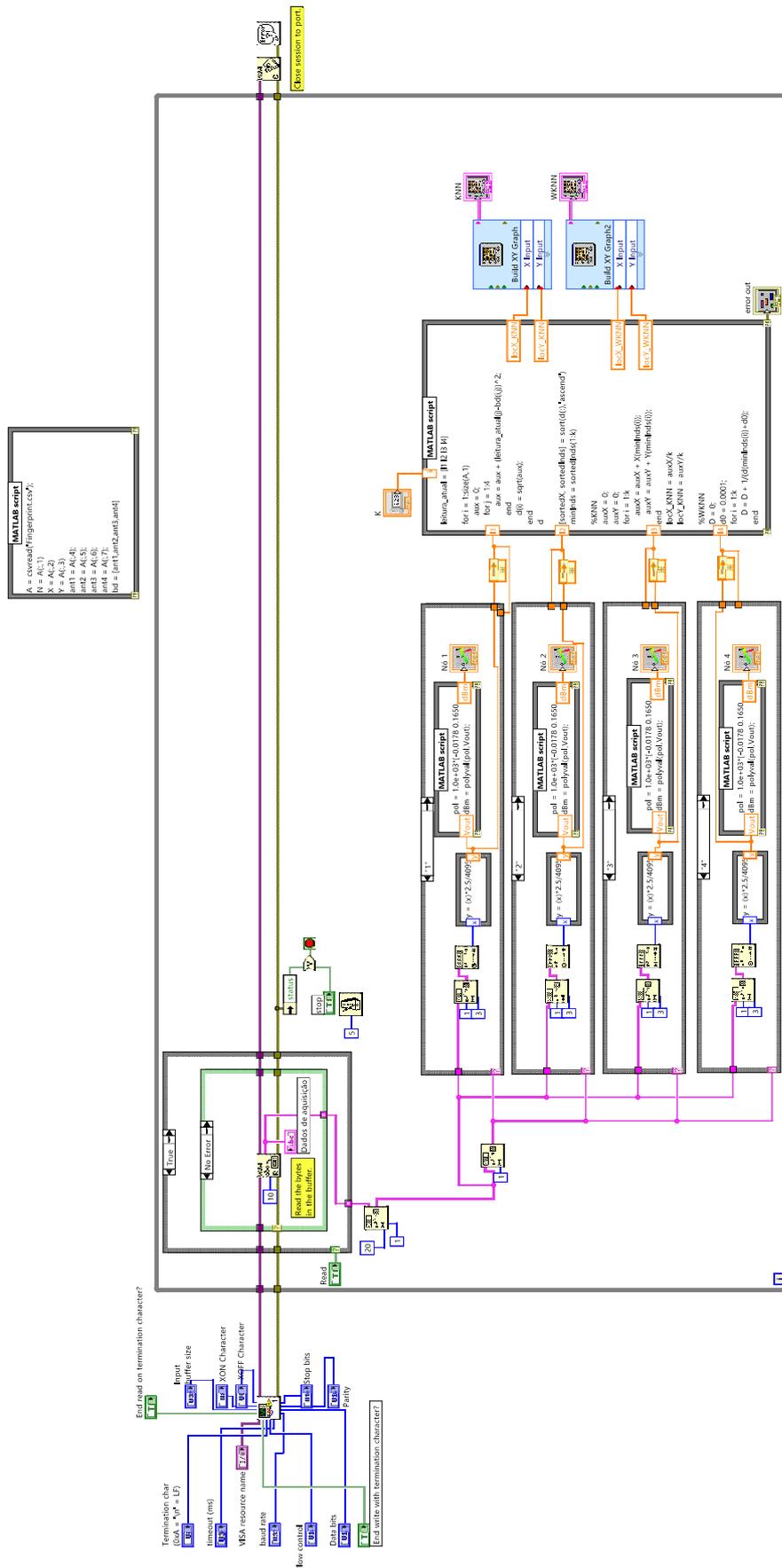
Apêndice A - Diagramas de Blocos dos Instrumentos Virtuais

Figura 1 Diagrama de Blocos do Instrumento Virtual da fase *offline* criado no LabVIEW.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 2 Diagrama de Blocos do Instrumento Virtual da fase *online* criado no LabVIEW.



Fonte: Produzida pelo autor.

Apêndice B - *Script* Matlab para Estimação da Localização com KNN e WKNN

```
1 %-----%
2 %No LabVIEW, o trecho do código abaixo pode ser separado em um
3 %script que seja executado antes do loop principal. Isso torna
4 %mais rápida a execução do instrumento virtual, já que os
5 %dados do fingerprint só precisam ser lidos uma vez.
6
7 %Dados lidos do arquivo CSV do fingerprint são armazenados na
8 %matriz A
9 A = csvread( 'Fingerprint.csv' );
10
11 %Número da posição, posição X e posição Y da antena irradiadora
12 %do sinal durante o fingerprinting
13 N = A(:,1);
14 X = A(:,2);
15 Y = A(:,3);
16
17 %Tensões lidas pelos nós 1, 2, 3 e 4 durante o fingerprinting
18 no_1 = A(:,4);
19 no_2 = A(:,5);
20 no_3 = A(:,6);
21 no_4 = A(:,7);
22
23 %Matriz bd armazena o banco de dados com as leituras das
24 %tensões nos 4 nós
25 bd = [no_1, no_2, no_3, no_4];
```

```
26 %-----%
27
28 %-----%
29 %O trecho do código abaixo deve ser colocado no script dentro
30 %do loop principal do instrumento virtual para estimação da
31 %localização em tempo real.
32
33 %Vetor com os dados da tensão do detector RF capturados pelo
34 %LabVIEW
35 atual = [atual1 , atual2 , atual3 , atual4 ];
36
37 %Cálculo da distância Euclidiana d(i) da leitura atual para
38 %cada linha do banco de dados do fingerprint
39
40 for i = 1:size(A,1)
41     aux = 0;
42     for j = 1:4
43         aux = aux + (atual(j)-bd(i,j))^2;
44     end
45     d(i) = sqrt(aux);
46 end
47
48 %Ordenamento em ordem crescente das distâncias Euclidianas
49 %da leitura atual com cada linha do banco de dados do
50 %fingerprint
51 [sortedX , sortedInds] = sort(d(:), 'ascend');
52 minInds = sortedInds(1:k);
53
54 %Estimação da localização pela método do KNN
55 auxX = 0;
56 auxY = 0;
57 for i = 1:k
58     auxX = auxX + X(minInds(i));
59     auxY = auxY + Y(minInds(i));
60 end
61 locX_KNN = auxX/k;
62 locY_KNN = auxY/k;
63
64 %Estimação da localização pela método do WKNN
```

```
65 D = 0;
66 d0 = 0.0001;
67 for i = 1:k
68     D = D + 1/(d(minInds(i))+d0);
69 end
70
71 auxX = 0;
72 auxY = 0;
73 for i = 1:k
74     auxX = auxX + (1/(d(minInds(i))+d0))*X(minInds(i));
75     auxY = auxY + (1/(d(minInds(i))+d0))*Y(minInds(i));
76 end
77 locX_WKNN = auxX/D;
78 locY_WKNN = auxY/D;
```

Apêndice C - Trabalhos submetidos/aceitos em anais de congressos

C.1 Lista dos trabalhos submetidos em congressos nacionais/internacionais durante o período do mestrado:

1. R. A. L. Vianna de Omena, J. J. Silva, J. S. da Rocha Neto, “Sistema de Detecção de Descargas Parciais com Rede de Sensores sem Fio e Instrumento Virtual,” em: Congresso Brasileiro de Automática - CBA, 2018, João Pessoa/PB - Brasil.

C.2 Lista dos trabalhos aceitos para publicação em congressos nacionais/internacionais durante o período do mestrado:

1. R. A. L. Vianna de Omena, J. J. Silva, J. S. da Rocha Neto, “WSN Integrated to a Virtual Instrument for Partial Discharges Detection and Localization,” em: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference - I2MTC, 2018, Houston - EUA.